

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 550.34.01

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-2-67-75

Оригинальная статья /Original Paper

Определение скоростей сейсмических волн на местности с применением искусственных нейронных сетей

Ю.А. Сидоркина¹, Т.Г. Асланов², Х.Д. Магомедов³

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

¹105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5 стр. 1, Россия,

²Дагестанский государственный технический университет,

²367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,

³Дагестанский филиал Федерального исследовательского центра

«Единая геофизическая служба» Российской академии наук,

³367008, г. Махачкала, ул. Белинского, 16, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является определение скоростей сейсмических волн на местности. **Метод.** Для определения скоростей сейсмических волн на различных участках земной коры при помощи выборки, полученной путем математического моделирования, была обучена искусственная нейронная сеть. Используя на входе обученной нейронной сети реальные значения разностей времен прихода сейсмических волн на местности, получаем на ее выходе значения скоростей сейсмических волн на местности. **Результат.** Предложен метод определения скоростей сейсмических волн на местности с применением искусственных нейронных сетей. Получены зависимости среднеквадратической ошибки определения скоростей сейсмических волн на местности от эпохи обучения, а также распределение ошибок в определении координат гипоцентра землетрясения с использованием полученной информации о структуре земли. **Вывод.** Предложенный метод позволяет определять структуру земной коры более точно, чем ранее предложенные математические методы.

Ключевые слова: нейронная сеть, скорости сейсмических волн, закон Снеллиуса, сейсмология, сейсмический датчик

Для цитирования: Ю.А. Сидоркина, Т.Г. Асланов, Х.Д. Магомедов. Определение скоростей сейсмических волн на местности с применением искусственных нейронных сетей. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49 (2): 67-75. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-67-75

Благодарности. Исследования выполнены при поддержке гранта Главы Республики Дагестан.

Determination of seismic wave velocities on the ground using artificial neural networks

Yu.A. Sidorkina¹, T.G. Aslanov², H.D. Magomedov³

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

¹5/1 Second Baumanskaya Str., Moscow 105005, Russia,

²Daghestan State Technical University,

²70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,

³Daghestan Branch of the Federal Research Center

"Unified Geophysical Service" of the Russian Academy of Sciences,

³16 Belinsky Str., Makhachkala 367008, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the study is to determine the velocities of seismic waves on the ground. **Method.** To determine the velocities of seismic waves in different parts of the earth's crust, using a sample obtained by mathematical modeling, an artificial neural network was trained. Us-

ing at the input of the trained neural network, the real values of the differences in the times of arrival of seismic waves on the ground, we obtain at its output the values of the velocities of seismic waves on the ground. **Result.** A method for determining the velocities of seismic waves on the ground using artificial neural networks is proposed. Dependences of the root-mean-square error in determining the velocities of seismic waves on the ground on the training epoch, as well as the distribution of errors in determining the coordinates of the earthquake hypocenter using the obtained information about the structure of the earth, are obtained. **Conclusion.** The proposed method makes it possible to determine the structure of the earth's crust more accurately than previously proposed mathematical methods.

Keywords: neural network, seismic wave velocities, Snell's law, seismology, seismic sensor

For citation: Yu.A. Sidorkina, T.G. Aslanov, H.D. Magomedov. Determination of seismic wave velocities on the ground using artificial neural networks. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2022; 49 (2): 67-75. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-67-75

Acknowledgments. The research was supported by a grant from the Head of the Republic of Daghestan.

Введение. В настоящее время координаты очага землетрясения определяются по времени вступления фаз сейсмических волн, записанных аппаратурой на сейсмических станциях с использованием различных методов (методы сфер или засечек и метод гиперболоидов) [1]. При этом в качестве исходных данных используются скорости сейсмических волн, разности времен пробега сейсмических волн до сейсмических датчиков, координаты мест расположения сейсмостанций, причем, считается, что скорости сейсмических волн для регионов известны. В то же время установлено, что они даже в пределах региона по разным участкам и направлениям отличаются друг от друга.

Ошибки определения координат гипоцентра землетрясения по существующим методам могут превышать десятки или даже сотни километров. Так при локации взрывов в Хибинском массиве проводимых в 1995-1997 годах, при использовании одномерной скоростной модели IASPEI₉₁, систематическая погрешность составляла около 50 километров [2]. Всероссийским научно-исследовательским институтом по проблемам гражданской обороны и чрезвычайным ситуациям (ВНИИ ГОЧС) МЧС России разработана программа, позволяющая по магнитуде землетрясения, глубине его очага, плотности населения в районе землетрясения, типам застроек [3], времени суток и т.д. оценить людские потери, что позволяет оперативно решить вопрос о количестве привлекаемых к спасательным работам людских, материальных и технических ресурсов [4 – 6].

Однако оценки потерь иногда не соответствуют действительности в основном из-за неверного определения глубины очага землетрясения, что вызвано, в том числе, неверными значениями скоростей сейсмических волн, принятых при расчетах [7]. Так, в частности, во время Иранского землетрясения (с эпицентром в районе г. Бам) 26 января 2003 года Федеральным центром науки и высоких технологий «Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайным ситуациям» 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 км). После корректировки величины глубины очага землетрясения в исходных данных в программе, расчетные потери были оценены в количестве 30 000 человек. В то же время, только на второй день, по сообщениям официальных иранских властей потери были оценены в пределах от 2 до 40 тысяч человек, на третий день говорилось о 20 000 человек, и, только почти через месяц 21 января 2004 года предварительная оценка потерь составила 35 000 человек [8, 9].

Постановка задачи. В настоящей статье разработан метод определения скоростей сей-

смических волн на исследуемой местности с использованием искусственных нейронных сетей. Для определения скоростей сейсмических волн на разных участках земли была обучена искусственная нейронная сеть. С использованием обучающей выборки из 10 000 землетрясений было проведено обучение искусственной нейронной сети. После обучения нейронной сети на виртуальных землетрясениях с целью получения усредненных скоростей сейсмических волн, на каждом из участков через нейронную сеть были пропущены 10 реально произошедших сейсмических событий в 2020 году на территории Республики Дагестан. Используя скорости полученных сейсмических волн, были оценены ошибки локализации сейсмических событий с использованием данных от 100 реальных землетрясений, произошедших в Дагестане в 2017 году.

Методы исследования. Определяя координаты сейсмического события, используя формулу для нахождения расстояния от сейсмического датчика до гипоцентра землетрясения, получаем ошибку, поясняемую на рис. 1 [10].

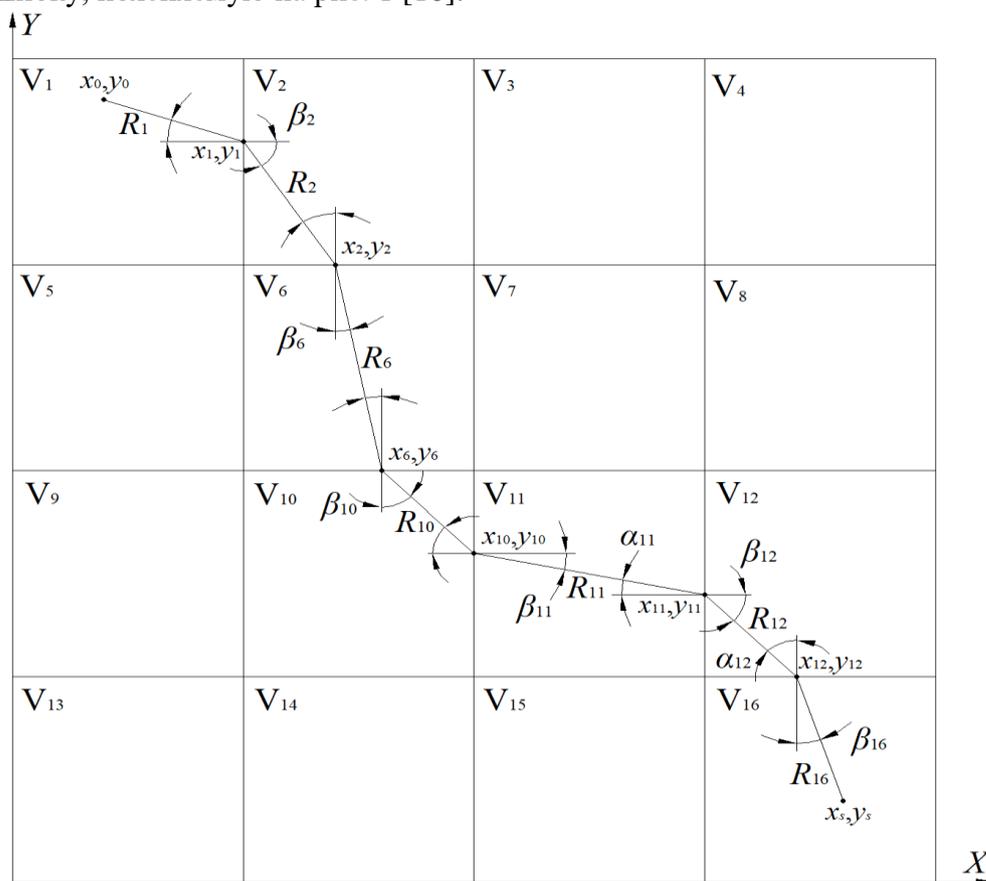


Рис. 1. Геометрические соотношения, поясняющие распространение сейсмической волны в неоднородной среде

Fig. 1. Geometric relations explaining the propagation of a seismic wave in an inhomogeneous medium

Так, сейсмическая волна распространяется не по прямой от очага землетрясения x_0, y_0 , до сейсмического датчика с координатами x_s, y_s , а по кривой в соответствии с правилами геометрической оптики (в приведенном примере кривая описана точками $x_0, y_0; x_1, y_1; x_2, y_2; x_6, y_6; x_{10}, y_{10}; x_{11}, y_{11}; x_{12}, y_{12}$ и x_s, y_s).

Исследуемая область представлена шестнадцатью участками с различными скоростями распространения сейсмической волны в каждой из них. В случае распространения сейсмической волны по диагонали с северо-запада на юго-восток, по закону Снеллиуса [11-13], возможные углы распространения сейсмической волны по азимуту будут лежать в диапазоне от 90 до 180 градусов и от 270 до 360 градусов, и, наоборот, при движении с северо-востока на юго-запад от 0 до 90 градусов и от 180 до 270 градусов.

По рис. 1 в соответствии со сказанным можно сделать вывод, что сейсмическая волна, зарегистрированная сейсмическим датчиком, может распространяться либо вправо, либо вниз, откуда вытекает, что для определения возможной траектории сейсмической волны следует рассматривать пересечение траекторий распространения сейсмической волны только с правыми и нижними гранями участков.

Для определения траектории движения сейсмической волны предположим, что нам известно каким образом меняется скорость распространения сейсмической волны по пути ее распространения, при этом участки с одинаковой скоростью имеют форму куба.

Тогда по закону Снеллиуса можно получить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} V_1 \sin \alpha_1 = V_2 \sin \beta_2 \\ V_2 \sin \alpha_2 = V_6 \sin \beta_6 \\ V_6 \sin \alpha_6 = V_{10} \sin \beta_{10} \\ V_{10} \sin \alpha_{10} = V_{11} \sin \beta_{11} \\ V_{11} \sin \alpha_{11} = V_{12} \sin \beta_{12} \\ V_{12} \sin \alpha_{12} = V_{16} \sin \beta_{16} \end{cases} \quad (1)$$

При этом очевидно, что:

$$\begin{cases} \alpha_2 = 90^\circ - \beta_2 \\ \alpha_6 = \beta_6 \\ \alpha_{10} = 90^\circ - \beta_{10} \\ \alpha_{11} = \beta_{11} \\ \alpha_{12} = 90^\circ - \beta_{11} \end{cases} \quad (2)$$

Подставив выражения (2) в систему уравнений (1), получим:

$$\begin{cases} V_1 \sin \alpha_1 = V_2 \sin \beta_2 \\ V_2 \cos \beta_2 = V_6 \sin \beta_6 \\ V_6 \sin \beta_6 = V_{10} \sin \beta_{10} \\ V_{10} \cos \beta_{10} = V_{11} \sin \beta_{11} \\ V_{11} \sin \beta_{11} = V_{12} \sin \beta_{12} \\ V_{12} \cos \beta_{12} = V_{16} \sin \beta_{16} \end{cases} \quad (3)$$

Используя определения тригонометрических функций, получим координаты пересечения сейсмической волны с границами участков с одинаковой скоростью:

$$\begin{cases} (y_s - y_{12}) \operatorname{tg} \beta_{16} = (x_s - x_{12}) \\ (x_{12} - x_{11}) \operatorname{tg} \beta_{12} = (y_{11} - y_{12}) \\ (x_{11} - x_{10}) \operatorname{tg} \beta_{11} = (y_{10} - y_{11}) \\ (y_6 - y_{10}) \operatorname{tg} \beta_{10} = (x_{10} - x_6) \\ (y_2 - y_6) \operatorname{tg} \beta_6 = (x_6 - x_2) \\ (x_2 - x_1) \operatorname{tg} \beta_2 = (y_1 - y_2) \\ (y_0 - y_1) \operatorname{tg} \alpha_1 = (x_1 - x_0) \end{cases} \quad (4)$$

В системе уравнений (4) известными являются переменные $x_0, y_0, x_1, y_1, x_2, y_2, x_6, y_6, x_{10}, y_{10}, x_{11}, y_{11}, x_{12}, y_{12}, x_s, y_s$. Произведя подстановку (3) в (4) после некоторых преобразований, получим уравнения вида:

$$\alpha_1 = f(x_0, y_0, x_1, y_1, x_2, y_2, x_6, y_6, x_{10}, y_{10}, x_{11}, y_{11}, x_{12}, y_{12}, x_s, y_s, V_1, V_2, V_6, V_{10}, V_{11}, V_{12}, V_{16}) \quad (5)$$

В соответствии с уравнениями (3) и (4), зная угол α_1 , может быть получена искомая траектория распространения сейсмической волны, заданной координатами ломаной кривой. Общее количество возможных комбинаций распространения сейсмических волн составляет – 20,

из которых после решения систем уравнений (1) – (4) количество комбинаций значительно сократится. При этом для дальнейшего анализа в качестве искомой траектории сейсмической волны используем только ту, которая имеет наименьшую разность времён прихода сейсмических волн.

Используем искусственные нейронные сети для определения скоростей сейсмических волн на разных участках земной коры. Для этого создадим компьютерную модель Дагестана, включающую в себя центральный, горный и южный территориальные округа размерами двести на двести километров с размещением на ней 17 сейсмических датчиков с координатами, соответствующими реальным. Исследуемая область была разбита на 16 участков (рис. 2).

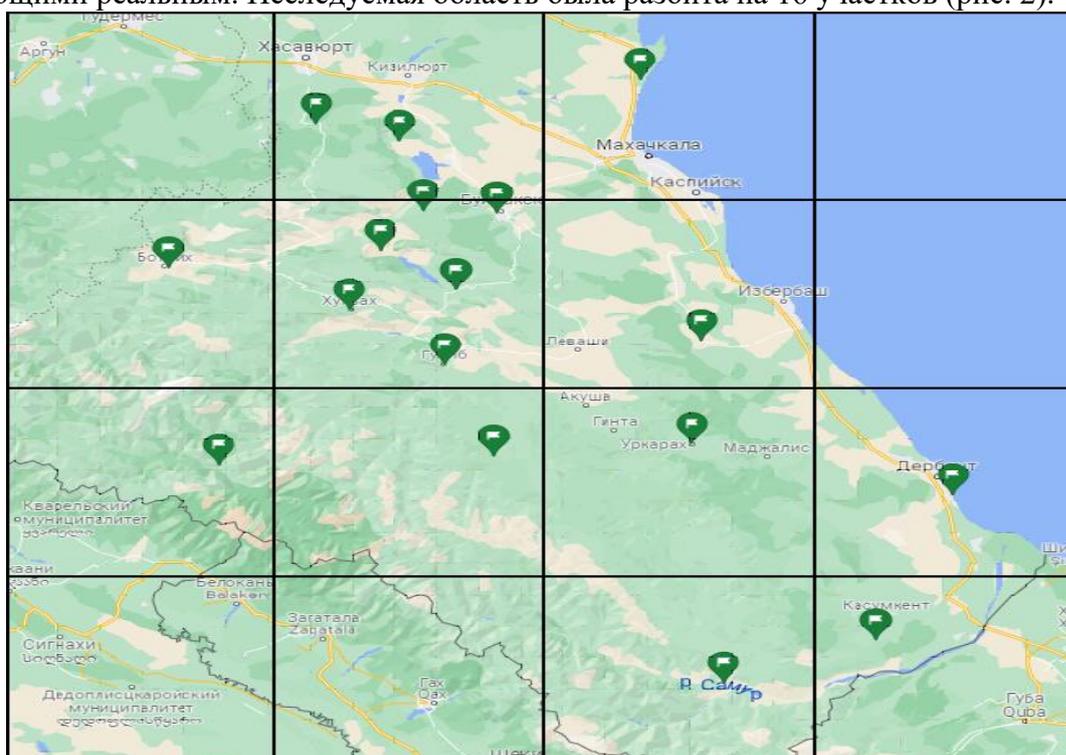


Рис. 2. Модель разбиения территории Республики Дагестан для определения скоростей сейсмических волн

Fig. 2. Model of division of the territory of the Republic of Dagestan to determine the velocities of seismic waves

Меняя случайным образом скорости продольных и поперечных сейсмических волн для каждого из 16 исследуемых участков и задавая координаты очага землетрясений, определялись разности времен пробега сейсмических волн к каждому из 17 сейсмических датчиков. При этом для одной комбинации распределения скоростей сейсмических волн, случайным образом задавались координаты десяти сейсмических событий. Таким образом, для обучения искусственной нейронной сети была создана обучающая выборка из 10 000 землетрясений.

Для обучения искусственной нейронной сети использовался многослойная сеть с 50 скрытыми слоями с функцией активации – сигмоида [14-19]. В качестве входов в нейронную сеть использовались нормированные разности времен прихода продольной и поперечной сейсмических волн десяти сейсмических событий от гипоцентра землетрясения до каждого сейсмического датчика. Таким образом, у нейронной сети имеется 170 входов. Выходами искусственной нейронной сети являлись скорость продольной сейсмической волны для каждого из 16 участков.

На рис. 3 приведены результаты обучения нейронной сети с 16 входами, на которую подавалась информация о разности времен прихода сейсмических волн на каждый сейсмический датчик, использованием базы из 1000 землетрясений.

Как видно из рис. За обучение нейронной сети на обучающей выборке прошло успешно (синяя линия), в тоже время тестовые данные показывают на ошибки работы нейронной сети на данных, обучение по которым не проводилось.

На рис. 3б также видно, что выходные значения нейронной сети (ось ординат) не соответствуют значениям выборки (ось абсцисс) и имеют большой разброс.

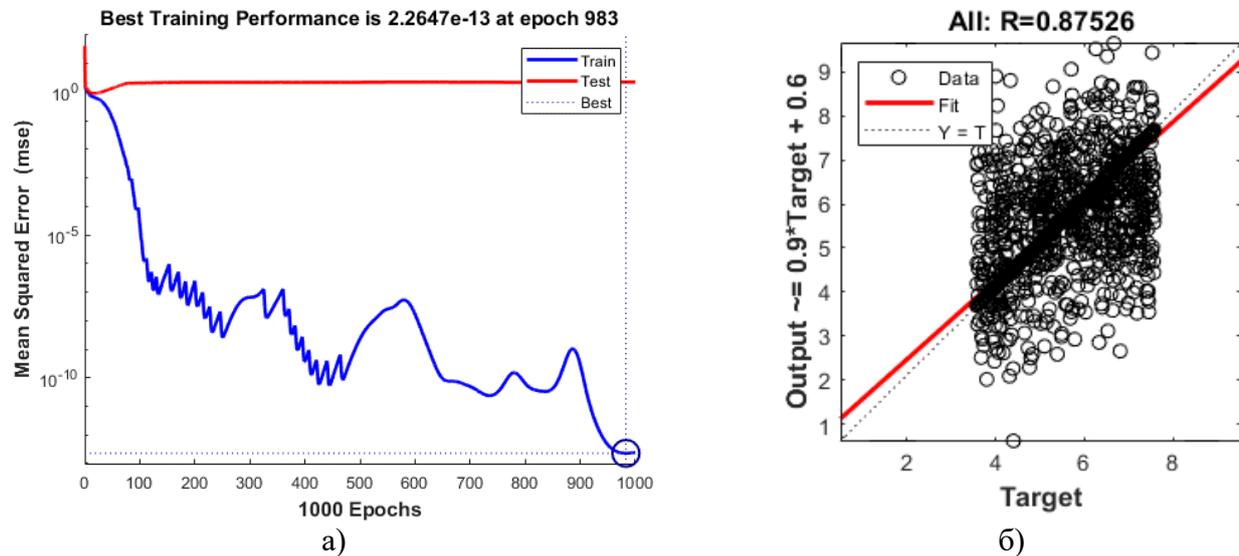


Рис. 3. Результаты обучения нейронной сети с вводом одного сейсмического события
Fig. 3. Results of neural network training with input of one seismic event

Одной из причин такого разброса может являться недостаточность входов в нейронную сеть, для формирования результатов на ее выходе.

На рис. 4 приведены результаты обучения нейронной сети со 160 входами, на которую подавалась информация о разности времен прихода сейсмических волн десяти сейсмических событий на каждый сейсмический датчик, с использованием базы из 10 000 землетрясений.

После обучения нейронной сети на виртуальных землетрясениях с целью получения усредненных скоростей сейсмических волн на каждом из участков через нейронную сеть были пропущены 10 реально произошедших сейсмических событий в 2020 году на территории Республики Дагестан. Используя скорости полученных сейсмических волн, были оценены ошибки локализации сейсмических событий с использованием данных от 100 реальных землетрясений, произошедших в Дагестане в 2017 году.

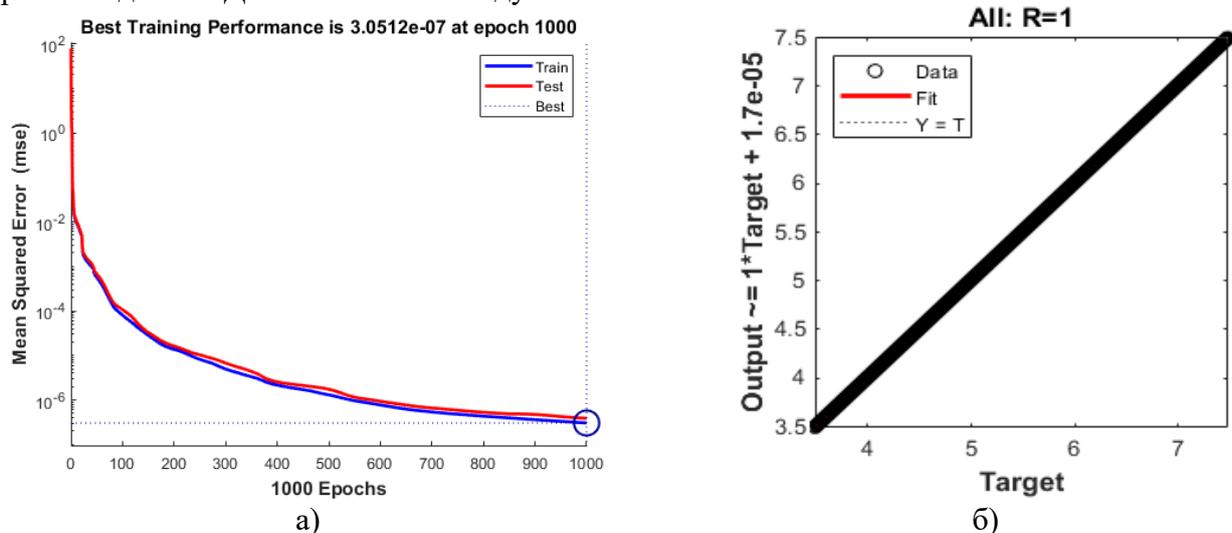


Рис. 4. Результаты обучения нейронной сети с вводом десяти сейсмических событий
Fig. 4. Results of training a neural network with the input of ten seismic events

На рис. 5 приведено распределение ошибок в определении координат гипоцентра землетрясения с использованием метода сфер [20].

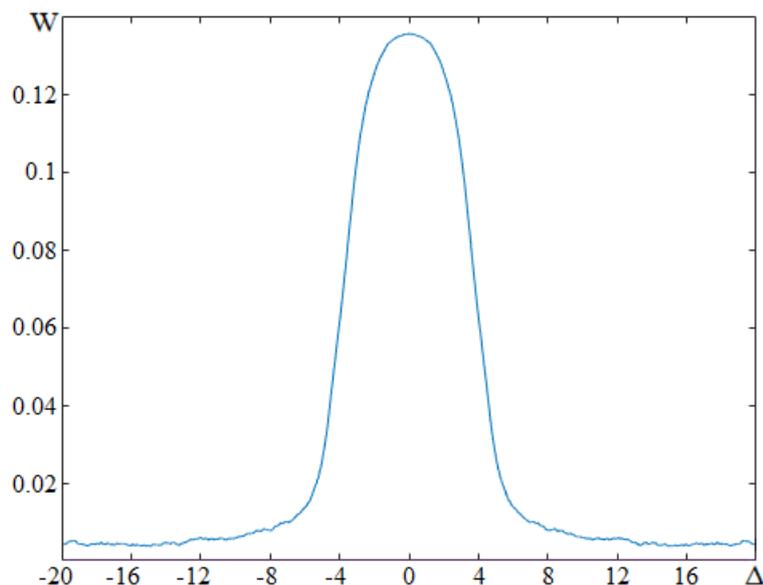


Рис. 5. Проверка адекватности результатов обучения нейронной сети

Fig.5. Checking the adequacy of neural network training results

Обсуждение результатов. Использование 160 входов в нейронную сеть вместо 16 обусловлено необходимостью корректного обучения нейронной сети. При этом для обучения нейронной сети со 160 входами было предпринято более 60 различных попыток обучения нейронной сети с различными распределениями скоростей сейсмических волн и расположением координат очага землетрясения, из которых только одно оказалось успешным.

Увеличение входов в нейронную сеть, либо увеличение обучающей выборки, а также увеличение числа участков, на которых необходимо определить структуру земной коры ведет к значительному увеличению времени обучения нейронной сети.

Как видно по распределению ошибок локализации координат 364 000 сейсмических событий, нейронная сеть, обученная определять скорости лишь на 16 участках земной коры, дает приемлемые результаты. Для более точного определения координат гипоцентра землетрясения необходимо производить правильный выбор сейсмических датчиков на местности [21].

Для более корректного обучения нейронной сети определению скоростей пробега сейсмических волн на различных участках земной коры, необходимо учитывать в расчетах помимо преломления волн на границах сред, еще и их отражения, для отслеживания распространения волны по естественным волноводам.

Информация о направлении движения сейсмической волны необходима для уменьшения необходимого машинного времени для сбора статистических данных.

Вывод. Приведенные результаты моделирования ни в коем случае не претендуют на окончательность, они, несомненно, нуждаются в уточнении и конкретизации. Однако следует отметить, что нейронная сеть, которая была обучена на математической модели Республики Дагестан и апробирована на 100 реальных землетрясениях, показала значительное уменьшение ошибок в определении координат гипоцентра землетрясения при использовании данных о скоростях сейсмических волн.

Библиографический список:

1. Кульчицкий, В. Е. Новые годографы сейсмических волн крымско-Черноморского региона / В. Е. Кульчицкий // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. – 2018. – Т. 4 (70). – № 4. – С. 164-173.

2. Скоростные модели. Кольский филиал Единой Геофизической службы РАН [сайт]. — URL: http://krsc.ru/?q=ru/Travel_time_models (дата обращения: 21.06.2022).
3. Шахрамьян, М. А. Технология оценки устойчивости и сейсмостойкости зданий и сооружений / М. А. Шахрамьян, Г. М. Нигметов, М. Ю. Прошляков // Технологии гражданской безопасности. – 2004. – № 2(6). – С. 27-37.
4. Шахрамьян, М. А. Оценка сейсмического риска и прогноз последствий землетрясений в задачах спасения населения: (теория и практика) / М. А. Шахрамьян. 2-е издание, переработанное и дополненное. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, 2000. – 192 с. – ISBN 5-93970-001-2.
5. Морозов, В. Н. Прогнозирование и ликвидация последствий аварийных взрывов и землетрясений: (теория и практика) / В. Н. Морозов, М. А. Шахрамьян. – Москва: УРСС, 1998. – 230 с.
6. Асланов Г.К., Алимерденов В.С., Асланов Т.Г., Тагиров Х.Ю. Математическая модель для расчета энергетического класса, интенсивности и магнитуды землетрясения в реальном времени. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2015;37(2):66-71. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2015-37-2-66-71>
7. Асланов Г.К., Асланов Т.Г., Курбанмагомедов К.Д., Шахтарин Б.И. Исследование зависимости ошибок определения координат фокуса землетрясения от расчетных методов (сферы и гиперболоиды). Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44(4):87-98. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-4-87-98>
8. Рогожин, Е.А. Землетрясение в Иране. География. Электронный журнал, 5 [сайт]. — URL: <http://geo.1september.ru/article.php?ID=200400503> (дата обращения: 21.04.2022).
9. 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. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2018-45-4-78-88>
10. Артемьев А.Е. Физические основы сейсморазведки: Учебное пособие – Саратов: ООО Издательский Центр «Наука», 2012. – 56с.
11. Дучков, А. А. Геометрическая сейсмика 1. Лучевой метод: учебное пособие / А. А. Дучков. — Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2019. — 63 с. — ISBN 978-5-7782-3842-8. — Текст: электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/99176.html> (дата обращения: 21.04.2022)
12. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. – М.: Наука, 1980. – 306 с.
13. Гольдин С.В. Введение в геометрическую сейсмику: учебное пособие. Новосибирск: Изд-во НГУ, 2005. 264 с.
14. Павлова, А. И. Искусственные нейронные сети: учебное пособие / А. И. Павлова. — Москва: Ай Пи Ар Медиа, 2021. — 190 с. — ISBN 978-5-4497-1165-6. — Текст: электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/108228.html> (дата обращения: 21.06.2022).
15. Барский, А. Б. Введение в нейронные сети: учебное пособие / А. Б. Барский. — 3-е изд. — Москва, Саратов: Интернет-Университет Информационных Технологий (ИНТУИТ), Ай Пи Ар Медиа, 2020. — 357 с. — ISBN 978-5-4497-0309-5. — Текст: электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/89426.html> (дата обращения: 21.06.2022).
16. Яхьяева, Г. Э. Нечеткие множества и нейронные сети: учебное пособие / Г. Э. Яхьяева. — 4-е изд. — Москва: Интернет-Университет Информационных Технологий (ИНТУИТ), Ай Пи Ар Медиа, 2020. — 315 с. — ISBN 978-5-4497-0665-2. — Текст: электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/97552.html> (дата обращения: 21.06.2022)
17. Медведев В. С. Нейронные сети. MATLAB 6 / В.С. Медведев, В.Г. Потемкин. — М.: Диалог-МИФИ, 2002.
18. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский; пер. с польск. И.Д. Рудинского. — М.: Финансы и статистика, 2002. —
19. Рутковский Л. Методы и технологии искусственного интеллекта / Л. Рутковский; пер. с польск. И. Д. Рудинского. — М.: Горячая Линия – Телеком, 2010.
20. Т.Г. Асланов, Ю.А. Сидоркина. Определение координат гипоцентра землетрясения при известной структуре земной коры. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48(4): 64-71. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-4-64-71
21. 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. 2016;43 (4):73-84. DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-73-84

References:

1. Kulchitsky V. E. New hodographs of seismic waves of the Crimean-Black Sea region [Uchenyye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya] *Scientific notes of the Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky. Geography. Geology*. 2018; 4 (70): 164-173 (In Russ)
2. High-speed models. Kola branch of the Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences [website]. — URL: http://krsc.ru/?q=ru/Travel_time_models (date of access: 06/21/2022). (In Russ)
3. Shakhramanyan M. A. Technology for assessing the stability and seismic resistance of buildings and structures / M. A. Shakhramanyan, G. M. Nigmatov, M. Yu. Proshlyakov. [Tekhnologii grazhdanskoy bezopasnosti] *Civil Security Technologies*. 2004; 2 (6): 27-37 (In Russ)
4. Shakhramanyan M.A. Seismic risk assessment and earthquake consequences prediction in the tasks of saving the population: (theory and practice) / M.A. Shakhramanyan. – 2nd edition, revised and supplemented. Moscow: All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergency Situations of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2000.: 192. ISBN 5-93970-001-2. (In Russ)

5. Morozov V. N. Forecasting and liquidation of the consequences of accidental explosions and earthquakes: (theory and practice) / V. N. Morozov, M. A. Shakhramanyan. - Moscow: URSS, 1998: 230. (In Russ)
6. Aslanov G.K., Alimerdenov V.S., Aslanov T.G., Tagirov Kh.Yu. Mathematical model for calculating the energy class, intensity and magnitude of an earthquake in real time. [Vestnik Dagestanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Tekhnicheskkiye nauki] *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical science*. 2015;37(2):66-71. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2015-37-2-66-71>(In Russ)
7. Aslanov G.K., Aslanov T.G., Kurbanmagomedov K.D., Shakhtarin B.I. Investigation of the dependence of errors in determining the coordinates of the earthquake focus on the calculation methods (spheres and hyperboloids). [Vestnik Dagestanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Tekhnicheskkiye nauki] *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical science*. 2017; 44(4):87-98. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-4-87-98> (In Russ)
8. Rogozhin E.A. Earthquake in Iran. Geography. Electronic magazine, 5 [website]. — URL: <http://geo.1september.ru/article.php?ID=200400503> (date of access: 04/21/2022). (In Russ)
9. Aslanov G.K., Aslanov T.G., Musaeva U.A. Anomalous errors in determining the coordinates of the source of earthquakes and proposals for their elimination. [Vestnik Dagestanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Tekhnicheskkiye nauki] *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science*. 2018; 45(4):78-88. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2018-45-4-78-88> (In Russ)
10. Artemiev A.E. Physical foundations of seismic exploration: Textbook - Saratov: OOO Publishing Center "Nauka", 2012: 56. (In Russ)
11. Duchkov A. A. Geometric seismic 1. Ray method: textbook. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2019: 63. - ISBN 978-5-7782-3842-8. Text: electronic. Digital educational resource IPR SMART: [website]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/99176.html> (date of access: 04/21/2022) (In Russ)
12. Kravtsov Yu.A., Orlov Yu.I. Geometric optics of inhomogeneous media. *M.: Nauka*, 1980: 306. (In Russ)
13. Goldin S.V. Introduction to geometric seismic: textbook. *Novosibirsk: Publishing House of NSU*, 2005: 264. (In Russ)
14. Pavlova A. I. Artificial neural networks: textbook.- Moscow: IP Ar Media, 2021: 190 ISBN 978-5-4497-1165-6. — Text: electronic // Digital educational resource IPR SMART: [website]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/108228.html> (date of access: 06/21/2022). (In Russ)
15. Barsky A. B. Introduction to neural networks: textbook / A. B. Barsky. - 3rd ed. - Moscow, Saratov: Internet University of Information Technologies (INTUIT), IP Ar Media, 2020: 357 - ISBN 978-5-4497-0309-5. — Text: electronic // Digital educational resource IPR SMART: [website]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/89426.html> (date of access: 06/21/2022). (In Russ)
16. Yakhyaeva G. E. Fuzzy sets and neural networks: textbook / G. E. Yakhyaeva. - 4th ed. — Moscow: Internet University of Information Technologies (INTUIT), IP Ar Media, 2021: 315. - ISBN 978-5-4497-0665-2. — Text: electronic. Digital educational resource IPR SMART: [website]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/97552.html> (date of access: 06/21/2022) (In Russ)
17. Medvedev V. S. Neural networks. MATLAB 6 / V.S. Medvedev, V.G. Potemkin. M.: Dialogue-MEPHI, 2002. (In Russ)
18. Osovsky S. Neural networks for information processing / S. Osovsky; per. from Polish. I.D. Rudinsky. M.: *Finance and statistics*, 2002. (In Russ)
19. Rutkovsky L. Methods and technologies of artificial intelligence / L. Rutkovsky; per. from Polish. I. D. Rudinsky. - M.: Hot Line - Telecom, 2010. (In Russ)
20. T.G. Aslanov, Yu.A. Sidorkin. Determining the coordinates of the earthquake hypocenter with a known structure of the earth's crust. [Vestnik Dagestanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Tekhnicheskkiye nauki] *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science*. 2021; 48(4): 64-71. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-4-64-71(In Russ)
21. T. G. Aslanov, Kh. D. Magomedov, U. A. Musaeva, Kh. Yu. Tagirov. Influence of the spatial arrangement of seismic sensors on the accuracy of determining the earthquake hypocenter. [Vestnik Dagestanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Tekhnicheskkiye nauki] *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science*. 2016;43 (4):73-84. DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-73-84 (In Russ)

Сведения об авторах:

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

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

Магомедов Хаскил Джарулаевич, директор, info@dbgsras.ru

Information about the authors:

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

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

Haskil D.Magomedov, Director, info@dbgsras.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 11.05.2022.

Одобрена после рецензирования / Revedicd 02.06.2022.

Принята в печать /Accepted for publication 02.06.2022.