

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДАННЫХ О РАЗНОСТИ ВРЕМЕН ПРИХОДА ПРОДОЛЬНОЙ И ПОПЕРЕЧНОЙ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН НА СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАТЧИКАХ

Т.Г. Асланов

tabasik@gmail.com

ФГБОУ ВО «ДГТУ», г. Махачкала, Республика Дагестан,
Российская Федерация

Аннотация

Разработан метод восстановления данных на сейсмическом датчике, с помощью искусственных нейронных сетей смоделирована его работа. Для обучения искусственной нейронной сети выбраны два параметра: интервал времени между регистрациями на сейсмографе продольной (первичной) и поперечной (вторичной) сейсмических волн, а также интервал времени между регистрациями первичной сейсмической волны на двух сейсмографах, удаленных друг от друга. Для восстановления информации на сейсмографах использованы данные по 2636 землетрясениям, произошедшим в Республике Дагестан в 2020 г. На имеющихся 19 сейсмических станциях зарегистрировано менее 60 % общего числа произошедших землетрясений. Обучение нейронной сети проведено дважды для каждого сейсмического датчика. Первый раз с нулевыми значениями разности времен прихода сейсмических волн на сейсмографы, второй раз с восстановленными разностями времен по результатам обучения нейронной сети. Для обучения искусственной нейронной сети в качестве входов использованы интервалы времени между регистрациями волн на сейсмографах, данные которых известны, а в качестве выходов — разности времен, которые необходимо определить. Обученная нейронная сеть имеет коэффициент корреляции с реальными интервалами времени между регистрациями на сейсмографе сейсмических волн, превышающий 0,99919. Приведены графики зависимостей среднеквадратической ошибки работы нейронной сети по эпохам ее обучения, графики соответствия

Ключевые слова

Нейронная сеть, разность времен, сейсмические датчики, сейсмология, скорости сейсмических волн

результатов обучения, вычисленных нейронной сетью, и исходных данных, а также гистограммы ошибок работы нейронных сетей

Поступила 09.03.2022

Принята 23.05.2022

© Автор(ы), 2022

Исследования выполнены при поддержке гранта Главы Республики Дагестан

Введение. Программный комплекс, позволяющий оценить возможное число пострадавших от землетрясения лиц по магнитуде сейсмического события, координатам его гипоцентра, плотности населения, проживающего в сейсмоопасном районе, типам и качеству застроек [1], дню недели, времени суток и другим параметрам, разработан специалистами ФГБУ «ВНИИ ГОЧС» МЧС России. Программный комплекс позволяет оперативно решать вопросы о числе привлекаемых к спасательным работам людей, а также материальных и технических ресурсах [2–4]. Однако программные расчеты числа пострадавших от землетрясения лиц не всегда соответствуют реальным значениям в основном из-за неверно проведенной локализации сейсмического события, что вызвано, например, неверным выбором сейсмографов для расчета гипоцентра землетрясения в сейсмоопасном регионе [5–11]. Так, 26 января 2003 г. во время землетрясения в районе г. Бам (Исламская Республика Иран) специалисты ФГБУ «ВНИИ ГОЧС» оценили последствия землетрясения как не принесшие потерь, хотя потери были. Ошибку в оценку внесло неверное определение геофизическими службами Ирана глубины сейсмического события (вместо 15 км гипоцентр был определен на глубине 33 км). После корректировки исходных данных по координатам землетрясения в программном комплексе расчетные потери от землетрясения были оценены как ~ 30 тыс. чел. По сообщениям официальных иранских властей, 27 января 2003 г. число погибших оценено в пределах 2...40 тыс. чел., 28 января 2003 г. сообщалось о 20 тыс. чел. погибших и только 21 января 2004 г. предварительное число погибших составило 35 тыс. чел. [12, 13].

В настоящей работе предложены метод восстановления информации об интервале времени между регистрациями на сейсмографе сейсмических волн и метод имитации работы сейсмографа.

Методы исследования. Во время возникновения большинства сейсмических событий не все сейсмические датчики могут их зарегистрировать как вследствие низкой чувствительности самих сейсмографов, так и наличия шумов на входе сейсмического датчика [14].

Для восстановления интервалов времени между регистрациями на сейсмографах первичной и вторичной сейсмических волн использованы данные по 2636 землетрясениям, произошедшим в 2020 г. в Респуб-

лике Дагестан. На имеющихся 19 сейсмических станциях зарегистрировано менее 60 % общего числа произошедших землетрясений.

Распределение (по принятым кодам [15]) числа фиксаций землетрясений сейсмическими станциями составило: АКТ — 1073; ARKR — 2146; BTLR — 1341; BUJR — 974; DBK — 1381; DLMR — 964; DRN — 69; DVE — 655; GNBR — 1373; GROС — 581; HNZR — 1664; КМКR — 1847; KRNR — 2026; KSMR — 819; МАК — 327; SGKR — 773; TLTR — 1527; UNCR — 1935; URKR — 1020.

Для восстановления сейсмических данных дважды проведено обучение нейронной сети каждого сейсмического датчика, первый раз с нулевыми значениями разности во времени для сейсмических датчиков, время на которых зафиксировано не было, второй раз с восстановленными данными по первой итерации. При обучении нейронной сети в качестве входов использованы известные интервалы времени между регистрациями на сейсмографах первичной и вторичной сейсмических волн, а в качестве выходов — разности времен, зафиксированных сейсмическими датчиками, которые необходимо определить.

Архитектура нейронной сети с сигмоидной функцией активации, примененной для восстановления информации об интервале времени между регистрациями на 19-м сейсмографе первичной и вторичной сейсмических волн, приведена на рис. 1. Гистограмма ошибок восстановления информации об интервале времени между регистрациями первичной и вторичной сейсмических волн на сейсмографе ARKR показана на рис. 2. Синим цветом выделены ошибки, полученные на обучающей выборке, красным — на тестовой. Корреляция результатов выхода нейронной сети (Δt_N) со значениями разности времен прихода сейсмических волн, зафиксированными на сейсмическом датчике (Δt), приведена на рис. 3.

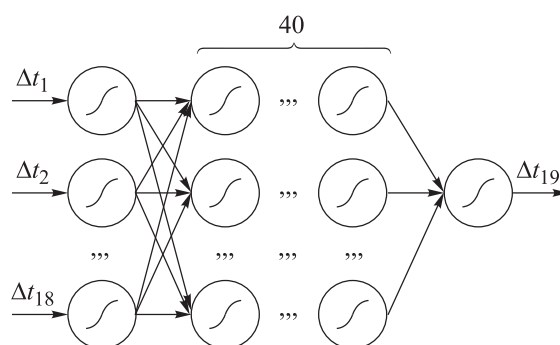


Рис. 1. Архитектура нейронной сети для восстановления интервала времени между регистрациями на сейсмографе первичной и вторичной сейсмических волн

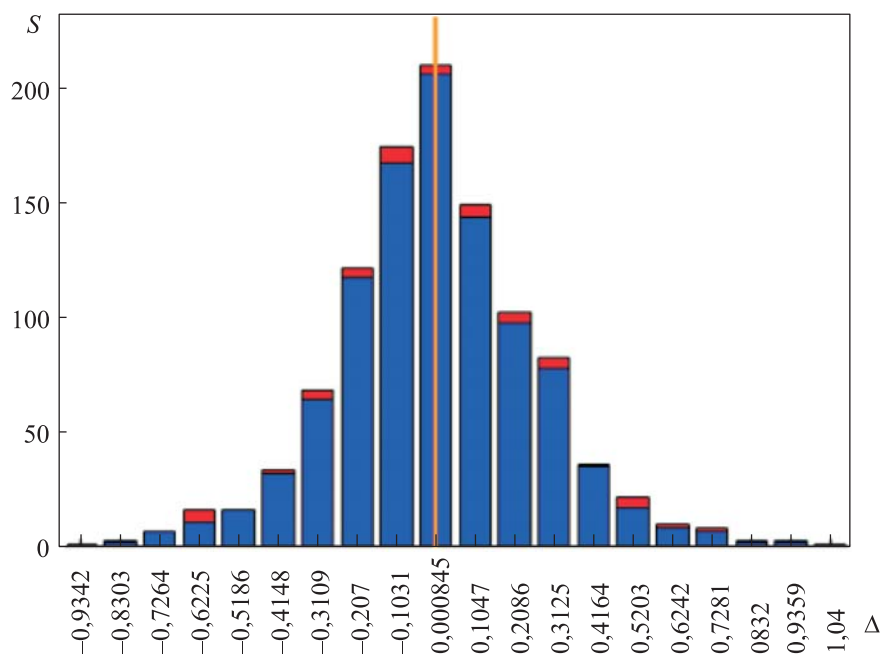


Рис. 2. Гистограмма ошибок восстановления информации об интервале времени между регистрациями на сейсмографе первичной и вторичной сейсмических волн

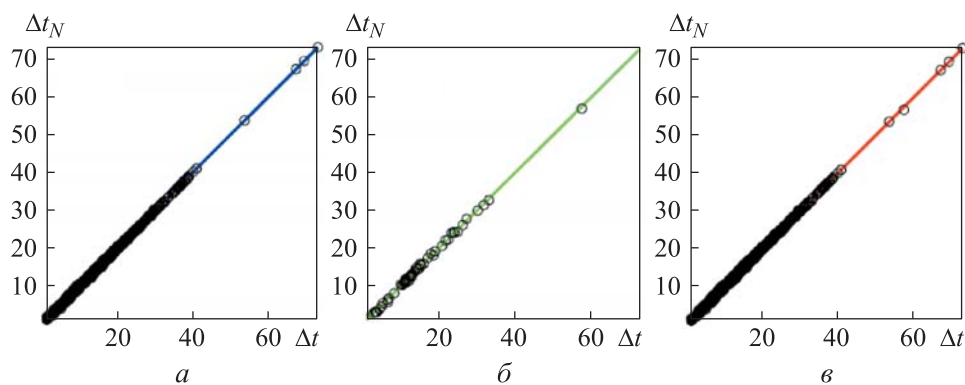


Рис. 3. Корреляция результатов обучения с данными, зарегистрированными на сейсмических датчиках

Результаты обучения нейронной сети на обучающей выборке, состоящей из 85 % общего числа данных, использованных для обучения, приведены на рис. 3, а, результаты проверки нейронной сети на тестовой выборке — на рис. 3, б, совместные результаты для обучающей и тестовой выборок — на рис. 3, в.

Обученная нейронная сеть имеет коэффициент корреляции с реальными значениями, равный 0,99956. Динамика обучения нейронной сети

по эпохам обучения, где по оси ординат отложена среднеквадратическая ошибка с выхода нейронной сети (σ), а по оси абсцисс — эпохи обучения нейронной сети (n), показана на рис. 4. Кривая синего цвета соответствует динамике обучения нейронной сети на обучающей выборке, красного — результату ее проверки с помощью тестовой выборки. При использовании тестовой выборки ошибка определения интервала времени между регистрациями на сейсмографе первичной и вторичной сейсмических волн составила $\sim 0,15$ с (см. рис. 4). Следует отметить, что инструментальная точность регистрации времени прихода сейсмических волн на самих сейсмических датчиках равна 0,1 с.

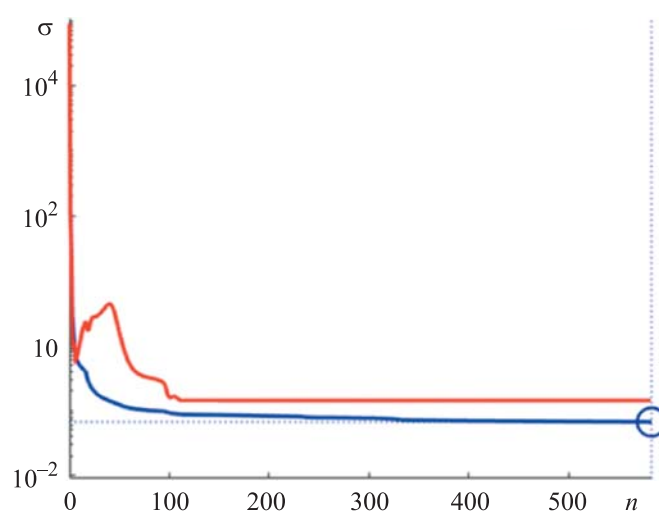


Рис. 4. Динамика обучения нейронной сети по эпохам

Для восстановления интервала времени между регистрациями первичной сейсмической волны на паре удаленных друг от друга сейсмографов выбран опорный сейсмический датчик, зарегистрировавший больше сейсмических событий (из 2636 землетрясений), относительно которого вычислены интервалы времени между регистрациями первичной сейсмической волны остальными 18 сейсмическими датчиками. Если данные сейсмического датчика отсутствовали, то разность времен равна нулю.

Аналогично предыдущему методу при восстановлении интервалов времени между регистрациями первичной сейсмической волны на паре удаленных друг от друга сейсмографов осуществлены две итерации обучения. По полученным данным вновь выбран сейсмический датчик, который зарегистрировал сейсмических событий больше остальных (с учетом восстановленных из 2637 землетрясений), и проведено обучение нейронной сети аналогично обучению для первого сейсмического датчика. Так прово-

дилось обучение нейронной сети до восстановления информации на всех сейсмических датчиках.

Семь итераций обучения нейронной сети (I) на выборке из 2637 землетрясений (S) для восстановления интервалов времени между регистрациями на 19 сейсмических датчиках (N) первичной сейсмической волны приведены на рис. 5.

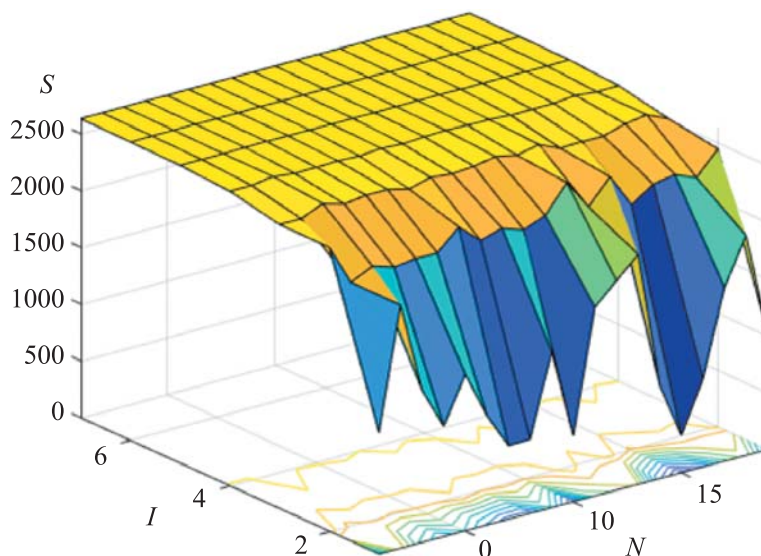


Рис. 5. Итерации обучения нейронной сети

После восстановления информации с помощью нейронной сети на седьмой итерации выбран первоначальный сейсмический датчик, зарегистрировавший наибольшее число сейсмических событий, и проведено повторное переобучение нейронной сети для восстановления информации о разности времен относительно других сейсмостанций. Аналогичное переобучение также выполнено и для других сейсмических станций.

Гистограмма ошибок восстановления интервала времени между регистрациями на опорном сейсмическом датчике (КМКР) и сейсмографе ARKR первичной сейсмической волны приведена на рис. 6. Синим цветом выделены ошибки, полученные на обучающей выборке, красным — на тестовой. Графики сравнения результатов обучения, вычисленных нейронной сетью (Δt_N), с исходными данными, зафиксированными на сейсмическом датчике (Δt), приведены на рис. 7. Результаты обучения нейронной сети на обучающей выборке, состоящей из 85 % общего числа данных, использованных для обучения, показаны на рис. 7, а, результаты проверки нейронной сети тестовой выборкой — на рис. 7, б, совместные

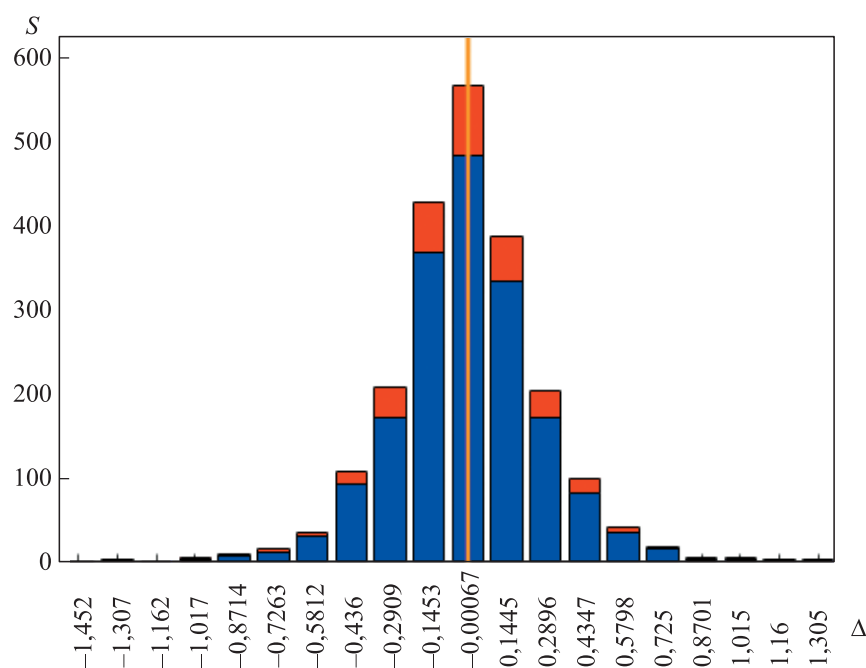


Рис. 6. Гистограмма ошибок расчета интервалов времени между регистрациями на опорном сейсмическом датчике и сейсмографе ARKR первичной сейсмической волны

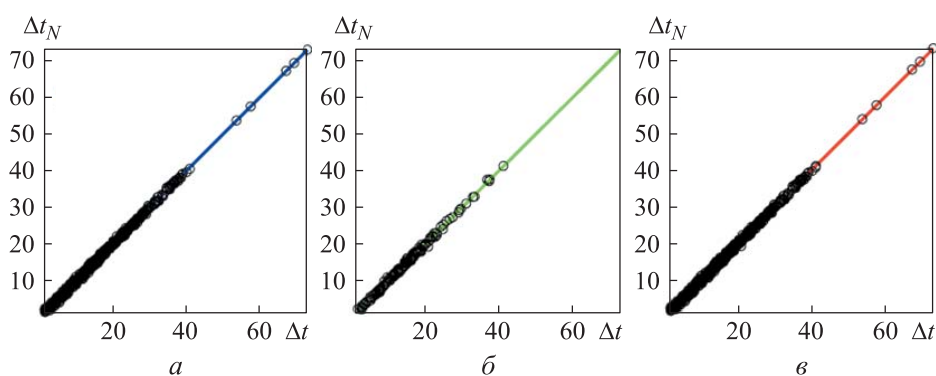


Рис. 7. Корреляция результатов обучения с данными, зарегистрированными на сейсмических датчиках

результаты обучающей и тестовой выборки — на рис. 7, в. Обученная нейронная сеть имеет коэффициент корреляции с реальными значениями интервалов времени регистрации сейсмических волн, равный 0,99913.

Динамика обучения нейронной сети по эпохам обучения, где по оси ординат отложена среднеквадратическая ошибка (σ) с выхода нейронной сети, а по оси абсцисс — эпохи обучения нейронной сети (n), показана

на рис. 8. Кривая синего цвета соответствует динамике обучения нейронной сети на обучающей выборке, красного — результату ее проверки с помощью тестовой выборки. В результате проверки на тестовой выборке обученной нейронной сети выявлено, что среднеквадратическая ошибка восстановления интервалов времени между регистрациями первичной сейсмической волны на паре удаленных друг от друга сейсмографов составила $\sim 0,1$ с, что сопоставимо с инструментальной точностью регистрации времени прихода сейсмических волн на сейсмических датчиках.

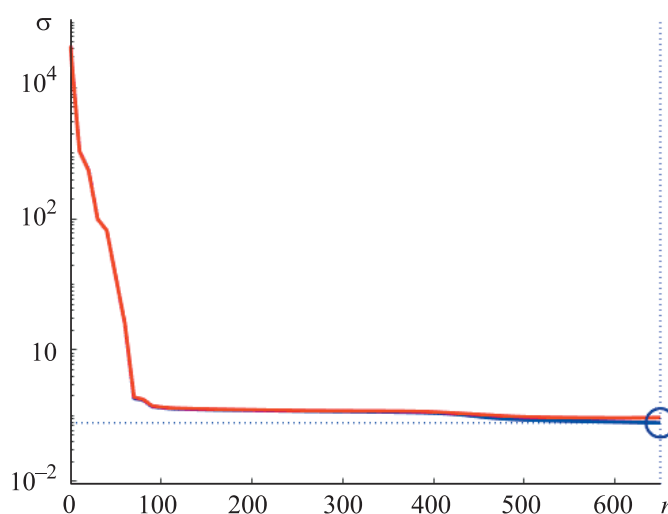


Рис. 8. Динамика обучения нейронной сети по эпохам

При наличии годовой базы данных по интервалам времени между регистрациями на всех сейсмографах первичной и вторичной сейсмических волн, а также по интервалам времени между регистрациями первичной сейсмической волны относительно опорного сейсмографа, один из сейсмических датчиков, например АКТ, может быть перемещен на новую локацию. После перемещения на сейсмическом датчике АКТ рассчитываются интервалы времени между регистрациями на сейсмографе первичной и вторичной сейсмических волн и интервалы времени между регистрациями первичной сейсмической волны на опорном сейсмическом датчике и сейсмическом датчике АКТ. При этом с использованием нейронной сети определяются интервалы времени между регистрациями первичной и вторичной сейсмических волн и интервалы времени между регистрациями первичной сейсмической волны опорным сейсмографом и сейсмографом АКТ по его предыдущему месту расположения.

Полученные данные с сейсмического датчика АКТ по новой локации используют для обучения новой нейронной сети имитировать сейсмический датчик АКТ на новой локации с помощью 18 оставшихся сейсмических датчиков, после чего сейсмический датчик АКТ перемещается на другую локацию.

Заключение. Обучение нейронной сети показало, что в случаях, когда для различных сейсмических событий ошибки измерения интервалов времени на сейсмографах имеют нормальное распределение, исследуемый сейсмический датчик обучается по значению математического ожидания этих значений.

Увеличение разброса ошибок при определении интервала времени между регистрациями первичной сейсмической волны на паре сейсмографов по сравнению с разбросом ошибок при определении интервала времени между регистрациями первичной и вторичной сейсмических волн вызвано малым числом сейсмических датчиков, не позволяющих исследовать скорости сейсмических волн на трассах их распространения, и числом неизвестных данных при обучении нейронной сети с использованием информации об интервалах времени между регистрациями на паре сейсмографов первичной сейсмической волны.

При имитации работы сейсмических датчиков возможно получение информации о разности времен прихода первичной (продольной) и вторичной (поперечной) сейсмических волн и прихода первичной сейсмической волны относительно опорного сейсмического датчика в случаях, когда на сейсмическом датчике вследствие наличия шумов при регистрации сейсмической волны или низкой чувствительности получение таких данных невозможно. Границы фиксации разности времен прихода сейсмических волн на сейсмостанциях с помощью нейронной сети ограничены границами размещения сейсмической сети.

Имитация работы сейсмических датчиков может быть использована при проверке соответствия полученных данных на сейсмическом датчике и нейронной сети. Значительное рассогласование данных сейсмического датчика и нейронной сети может свидетельствовать о наличии аномального участка земной коры (сейсмического волновода или небольшого по размерам участка земной коры с резким изменением скорости пробега сейсмической волны), а также о неисправности сейсмического датчика либо о недообучении нейронной сети.

Обученная нейронная сеть позволяет восстанавливать интервалы времени между регистрациями на сейсмографах сейсмических волн. Уве-

личение виртуального числа сейсмических датчиков, участвующих в расчете гипоцентра землетрясения, позволит значительно повысить точность локализации сейсмического события.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шахраманьян М.А., Нигметов Г.М., Прошляков М.Ю. Технология оценки устойчивости и сейсмостойкости зданий и сооружений. *Технологии гражданской безопасности*, 2004, № 2, с. 27–37.
- [2] Шахраманьян М.А. Оценка сейсмического риска и прогноз последствий землетрясений в задачах спасения населения. М., ВНИИ ГОЧС, 2000.
- [3] Морозов В.Н., Шахраманьян М.А. Прогнозирование и ликвидация последствий аварийных взрывов и землетрясений. М., URSS, 1998.
- [4] 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, т. 46, № 2, с. 61–70. DOI: <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-2-61-70>
- [5] Шахтарин Б.И., Асланов Г.К., Асланов Т.Г. и др. Определение координат очага землетрясения с использованием фигур второго порядка — эллипса и гиперболы. *Автоматизация. Современные технологии*, 2018, т. 72, № 11, с. 503–509.
- [6] Асланов Т.Г. Определение координат очага землетрясения с использованием комбинированного метода. *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*, 2017, т. 44, № 2, с. 118–125. DOI: <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-2-118-125>
- [7] Асланов Т.Г., Магомедов Х.Д., Мусаева У.А. и др. Влияние пространственного расположения сейсмодатчиков на точность определения гипоцентра землетрясения. *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*, 2016, т. 43, № 4, с. 73–84. DOI: <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2016-43-4-73-84>
- [8] 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, т. 46, № 4, с. 134–142. DOI: <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-4-134-142>
- [9] Асланов Г.К., Асланов Т.Г. Определение среднего значения ошибки в вычислении координат эпицентра землетрясения. *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*, 2021, т. 48, № 2, с. 20–28. DOI: <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2021-48-2-20-28>
- [10] Асланов Г.К., Асланов Т.Г., Курбанмагомедов К.Д. и др. Исследование зависимости ошибок в определении координат очага землетрясения от методов расчета (сфер и гиперболюидов). *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*, 2017, т. 44, № 4, с. 87–98. DOI: <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-4-87-98>

[11] Асланов Г.К., Асланов Т.Г. Определение координат гипоцентра землетрясения методом окружностей. *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*, 2021, т. 48, № 3, с. 52–58.

DOI: <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2021-48-3-52-58>

[12] Рогожин Е.А. Землетрясение в Иране. *География*, 2004, № 5.

URL: <http://geo.1september.ru/article.php?ID=200400503>

[13] 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, т. 45, № 4, с. 78–88. DOI: <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2018-45-4-78-88>

[14] Кедров О.К. Сейсмические методы контроля ядерных испытаний. М., ИФЗ РАН, 2005.

[15] Сеть стационарных сейсмических станций. *dbgsras.ru: веб-сайт*.

URL: <http://dbgsras.ru/article/view/set-stacionarnyh-sejsmiceskih-stancij> (дата обращения: 15.06.2022).

Асланов Тагирбек Гайдарбекович — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры «Управление и информатика в технических системах и вычислительная техника» ФГБОУ ВО «ДГТУ» (Российская Федерация, 367026, Республика Дагестан, г. Махачкала, пр-т Имама Шамиля, д. 70).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Асланов Т.Г. Восстановление данных о разности времен прихода продольной и поперечной сейсмических волн на сейсмических датчиках. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2022, № 3 (140), с. 4–17.

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2022-3-4-17>

RECOVERING SEISMIC SENSOR DATA ON ARRIVAL TIME DIFFERENCES FOR LONGITUDINAL AND TRANSVERSE SEISMIC WAVES

T.G. Aslanov

tabasik@gmail.com

FSBEI HE “DSTU”, Makhachkala, Republic of Dagestan, Russian Federation

Abstract

We developed a method for seismic sensor data recovery and simulated seismic sensor operation using artificial neural networks. We selected two parameters to train the artificial neural network on: the time between seismograph recordings of longitudinal (primary) and transverse (secondary) seismic waves, as well as the time between primary seismic wave recordings by two

Keywords

Neural network, time difference, seismic sensors, seismology, seismic wave velocities

seismographs located at a certain distance from each other. We used data on 2636 earthquakes that occurred in 2020 in the Republic of Dagestan for our seismograph data recovery. The existing 19 seismic stations recorded less than 60 % of the total number of earthquakes. To recover seismic data, we trained the neural network twice for each seismic sensor, the first time involving zero time differences regarding seismic wave arrival at seismographs that did not record the time, and the second time involving time differences recovered from the results of training the neural network for the first time. Times between seismic wave recordings with known data were used as inputs to train the artificial neural network, while time differences to be determined were designated as outputs. The trained neural network displays a correlation coefficient related to real time intervals between seismograph recordings of seismic waves that exceeds 0.99919. The paper provides root-mean-square error plots of the neural network operation by epochs of its training, plots demonstrating how training results calculated by the neural network match the initial data, and histograms of neural network operation errors

Received 09.03.2022

Accepted 23.05.2022

© Author(s), 2022

The study was supported by a grant awarded by the Head of the Republic of Dagestan

REFERENCES

- [1] Shakhramanyan M.A., Nigmatov G.M., Proshlyakov M.Yu. Technology for assessing stability and seismic resistance of buildings and structures. *Tekhnologii grazhdanskoj bezopasnosti*, 2004, no. 2, pp. 27–37 (in Russ.).
- [2] Shakhramanyan M.A. Otsenka seysmicheskogo riska i prognoz posledstviy zemletryaseniya v zadachakh spaseniya naseleniya [Seismic risk assessment and prediction of earthquake consequences in problems of population rescue]. Moscow, VNII GOChS Publ., 2000.
- [3] Morozov V.N., Shakhramanyan M.A. Prognozirovaniye i likvidatsiya posledstviy avariynykh vzryvov i zemletryaseniya [Forecasting and elimination of emergency explosions and earthquakes consequences]. Moscow, URSS Publ., 1998.
- [4] Aslanov T.G., Musaeva U.A. Analysis of error distribution density in determining the coordinates of earthing earth in the methods of spheres and ellipsoids. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Herald of Dagestan State Technical University. Technical Science], 2019, vol. 46, no. 2, pp. 61–70 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-2-61-70>

- [5] Shakhtarin B.I., Aslanov G.K., Aslanov T.G., et al. Determination of the earthquakes centre coordinates using second order figures: ellipse and hyperbola. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii*, 2018, vol. 72, no. 11, pp. 503–509 (in Russ.).
- [6] Aslanov T.G. Definition of earthquake focus coordinates using a combined method. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Herald of Dagestan State Technical University. Technical Science], 2017, vol. 44, no. 2, pp. 118–125 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-2-118-125>
- [7] Aslanov T.G., Magomedov Kh.D., Musaeva U.A., et al. Influence of the spatial arrangement of seismic detectors on the accuracy of earthquake hypocentre determination. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Herald of Dagestan State Technical University. Technical Science], 2016, vol. 43, no. 4, pp. 73–84 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2016-43-4-73-84>
- [8] Shakhtarin B.I., Aslanov T.G., Tetakaev U.R. Determination of earthquake focus coordinates using the Cassini oval method with second- and fourth-order hyperbola figures. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Herald of Dagestan State Technical University. Technical Science], 2019, vol. 46, no. 4, pp. 134–142 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-4-134-142>
- [9] Aslanov G.K., Aslanov T.G. Average error determination in the calculation of earthquake epicenter coordinates. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Herald of Dagestan State Technical University. Technical Science], 2021, vol. 48, no. 2, pp. 20–28 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2021-48-2-20-28>
- [10] Aslanov G.K., Aslanov T.G., Kurbanmagomedov K.D., et al. Investigation of the dependence of earthquake focus coordinate determination errors on calculation methods (spheres and hyperboloids). *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Herald of Dagestan State Technical University. Technical Science], 2017, vol. 44, no. 4, pp. 87–98 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-4-87-98>
- [11] Aslanov G.K., Aslanov T.G. Determination of coordinates of the earthquake hypocenter by the method of circles. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Herald of Dagestan State Technical University. Technical Science], 2021, vol. 48, no. 3, pp. 52–58 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2021-48-3-52-58>
- [12] Rogozhin E.A. Earthquake in Iran. *Geografiya*, 2004, no. 5 (in Russ.). Available at: <http://geo.1september.ru/article.php?ID=200400503>
- [13] Aslanov G.K., Aslanov T.G., Musaeva U.A. Anomalous errors in determining focus coordinates earthquakes and suggestions for their elimination. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Herald of Dagestan State Technical University. Technical Science], 2018, vol. 45, no. 4, pp. 78–88 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2018-45-4-78-88>

[14] Kedrov O.K. Seismicheskie metody kontrolya yadernykh ispytaniy [Seismic methods of nuclear tests monitoring]. Moscow, IPE RAS Publ., 2005.

[15] Set stacionarnykh seismicheskikh stantsiy [Network of stationary seismic stations]. *dbgsras.ru: website* (in Russ.).

Available at: <http://dbgsras.ru/article/view/set-stacionarnyh-seismicheskikh-stancij> (accessed: 15.06.2022).

Aslanov T.G. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Lecturer, Department of Management and Information Technology in Technical Systems and Computer Engineering, FSBEI HE “DSTU” (Imama Shamilya prospekt 70, Makhachkala, Republic of Dagestan, 367026 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Aslanov T.G. Recovering seismic sensor data on arrival time differences for longitudinal and transverse seismic waves. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2022, no. 3 (140), pp. 4–17 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2022-3-4-17>