

УДК 004.9

DOI: [10.26102/2310-6018/2025.49.2.043](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.49.2.043)

Проектирование системы мониторинга сейсмических волн на основе нейронной сети

Э.М. Вихтенко¹✉, С.К. Лукашевич¹, И.С. Манжула²

¹*Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Российская Федерация*

²*Вычислительный центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, Хабаровск, Российская Федерация*

Резюме. Статья посвящена вопросу проектирования автоматизированной информационной системы для мониторинга сейсмологической активности в Дальневосточном регионе России. Дальний Восток относится к сейсмоопасным районам, но в связи с особенностями территориального развития система контроля сейсмологической обстановки в регионе недостаточно развита. В настоящее время исследователями ведутся работы по организации системы сбора сейсмологических данных. Собранные сведения о сейсмологических событиях в регионе предоставляют возможность для их дальнейшего анализа с целью выявления ранее неизвестных закономерностей и разработки методов предсказания землетрясений до начала их влияния на инфраструктуру региона. В исследовании рассматриваются существующие методы измерения и отметки сейсмологических волн и особенности территории для составления требований к системе. В результате исследования предложены логическая и физическая схемы системы мониторинга, основанной на применении нейронных сетей для отслеживания прибытия Р и S волн в режиме, близком к режиму реального времени. В разрабатываемой системе предусмотрены модули получения и накопления первичных данных, а также модуль работы нейронной сети. Структура информационной системы планируется максимально гибкой для удобной настройки архитектуры сети и ее обучения.

Ключевые слова: система мониторинга, сейсмические волны, землетрясения, STA/LTA, инженерия, нейронная сеть, большие данные.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ, дополнительное соглашение от 27 февраля 2025 г. № 075-02-2025-1538.

Для цитирования: Вихтенко Э.М., Лукашевич С.К., Манжула И.С. Проектирование системы мониторинга сейсмических волн на основе нейронной сети. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2025;13(2). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1922> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.49.2.043

Designing a seismological wave monitoring system based on neural networks

E.M. Vikhtenko¹✉, S.K. Lukashevich¹, I.S. Manzhula²

¹*Pacific National University, Khabarovsk, the Russian Federation*

²*Computing Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, the Russian Federation*

Abstract. The article is devoted to the issue of designing an automated information system for monitoring seismological activity in the Far Eastern region of Russia. The Far East belongs to earthquake-prone areas, but due to the peculiarities of territorial development, the system of monitoring the seismological situation in the region is not sufficiently developed. Currently, researchers are working on organizing a system for collecting seismological data. The collected information on seismological events in the region provides an opportunity for their further analysis in order to identify previously

unknown patterns and develop methods for predicting earthquakes before their impact on the region's infrastructure. The study examines the existing methods of measuring and marking seismic waves and the features of the territory for drawing up requirements for the system. As a result of the research, logical and physical schemes of the monitoring system are proposed, based on the use of neural networks to track the arrival of P and S waves in a mode close to the real-time mode. The system under development includes modules for obtaining and accumulating primary data, as well as a neural network module. The structure of the information system is planned to be as flexible as possible for convenient configuration of the network architecture and its training.

Keywords: monitoring system, seismic waves, earthquakes, STA/LTA, engineering, neural network, big data.

Acknowledgements: The work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Supplementary Agreement No. 075-02-2025-1538 dated February 27, 2025.

For citation: Vikhtenko E.M., Lukashevich S.K., Manzhula I.S. Designing a seismological wave monitoring system based on neural networks. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(2).

(In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1922> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.49.2.043

Введение

Дальний Восток является сейсмоопасным регионом Российской Федерации [1] в связи с его расположением рядом с областью столкновения Тихоокеанской и Евразийской литосферных плит. В связи с этим для защиты местного населения от последствий землетрясений различных магнитуд требуется полное представление о текущей сейсмической ситуации на всем регионе. К примеру, регион Приморья и Приамурья относится к числу сейсмоактивных областей России, сейсмичность которых изучена недостаточно [2].

В настоящее время в регионе различными научными группами ведутся работы по сбору сейсмологических данных [3]. Набранные сведения о сейсмологических событиях в регионе предоставляют возможность для их дальнейшего анализа с целью выявления ранее неизвестных закономерностей и разработки методов предсказания землетрясений до начала их влияния на инфраструктуру региона.

Стоит также отметить, что, в связи с обширностью исследуемой территории Российской Федерации, доступные в практике средства измерения сейсмограмм являются неточными и приводят к сейсмологическому шуму. Для качественной работы на некачественных данных требуется новый метод классификации сейсмологических событий. Кандидатом метода решения данной задачи являются нейронные сети, способные оптимизировать свою работу на основе отмеченных данных для выполнения интеллектуальной работы с требуемой точностью.

Данная статья посвящена проектированию системы мониторинга сейсмологических событий на основе применения нейронных сетей. В работе проанализированы наиболее вероятные сценарии работы с данными и выявлены требования к системе мониторинга, построены логическая схема движения информации между модулями системы, а также физическая схема. Система проектируется с целью предоставления схем и требований для дальнейшей реализации и применения на практике.

Материалы и методы

Одним из наиболее важных регистрируемых компонентов при определении факта возникновения сейсмологического события являются P-волны и S-волны. P-волны – продольные волны как результат упругости сжатия. S-волны – поперечные волны как

результат упругости сдвига. Р-волна приходит всегда раньше S-волны [4]. Визуальное представление распространения Р и S волн в грунте представлено на Рисунке 1.

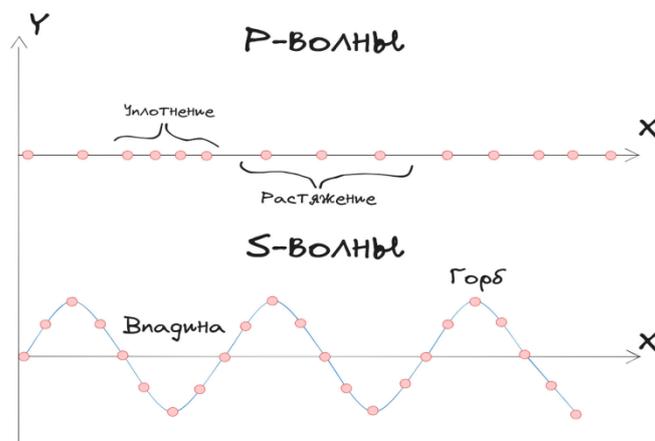


Рисунок 1 – Визуальное представление распространения Р и S волн
Figure 1 – Visual representation of P and S wave propagation

При известном времени прибытия Р и S волн открывается возможность определения времени и местоположения возникновения сейсмологического события.

Для отметки времени прибытия волн требуются сведения о движении грунта в трех направлениях:

- в вертикальном направлении;
- в направлении с Севера на Юг;
- в направлении с Востока на Запад.

При описании движения земли измеряется ее скорость, достаточной точностью измерения которой является кратность $1,5 \times 10^{-10}$ м/с, и достаточной дискретностью отметки скорости является измерение значения каждые 10 мс. В итоге исходные данные о движении грунта в разрезе одного канала принимают вид, показанный на Рисунке 2.

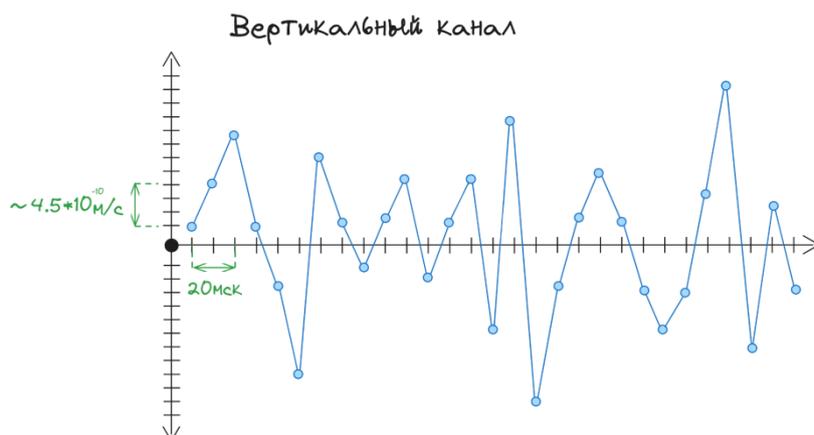


Рисунок 2 – Вертикальный канал измерения сейсмограммы
Figure 2 – Vertical channel of seismogram measurement

Для измерения всех необходимых сейсмограмм в различных точках территории Дальнего Востока требуется значительное количество измеряющих сейсмографов. Из-за этого необходимо учитывать вероятную необходимость работы с некачественными сейсмограммами и проводить соответствующую корректировку.

При этом, для точного определения места и времени возникновения сейсмологического события требуется достаточное количество близлежащих рабочих сейсмографов. В практике рекомендуется использовать три или более компонентов проведения измерений [5].

Учитывая факторы, указанные выше, можно предложить схему распределения сейсмографических устройств по территории региона (Рисунок 3).

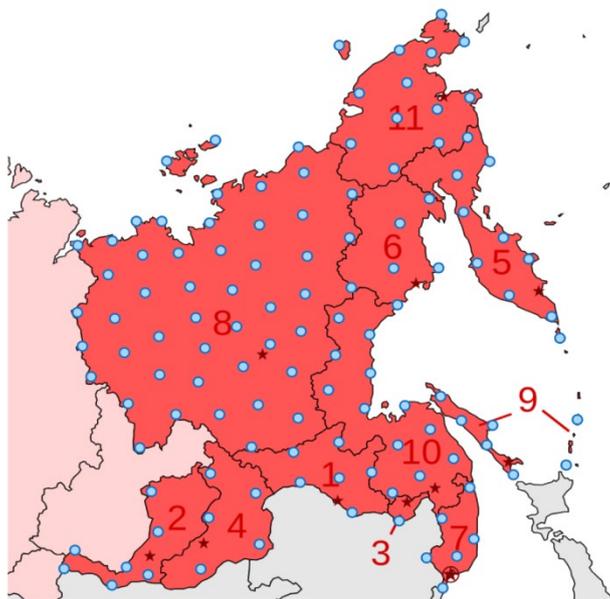


Рисунок 3 – Возможная сеть распределения сейсмографов на территории Дальнего Востока
 Figure 3 – Possible distribution network of seismographs in the Far East

Однако предложенная схема не является оптимальной. Для более точного построения карты размещения сейсмографов требуется уточнить ряд параметров, а именно:

- минимальный радиус восприятия события установленными сейсмографами;
- материал коры земли в радиусе восприятия установленных сейсмографов, влияющие на скорость и дальность распространения сейсмических волн;
- согласованная плотность покрытия и количество близлежащих сейсмографов в любой измеряемой точке территории для максимизирования точности определения времени, местоположения и характера сейсмического события;
- известные области повышенной сейсмической активности, требующие повышенный приоритет при проектировании и разворота сети.

В результате дополнительного анализа можно будет повысить практическую пользу от установленных устройств при минимальных затратах.

Задача определения точного времени прибытия сейсмических волн на основе предложенных сейсмограмм в трех разрезах является интеллектуальной задачей. Как следствие, эту задачу можно решить при помощи использования нейронных сетей [6].

В случае необходимости определения прибытия P и S волн на основе предложенных сейсмограмм входные данные представляют собой 3 набора проведенных измерений в определенном диапазоне времени, по одному на каждый канал измерения, в то время как на выходном слое выводится принадлежность отдельных моментов того же диапазона времени к классификациям «Прибытие P волны» и «Прибытие S волны». Таким образом, результатом вычисления значений выходного слоя нейронной сети становится набор значений от 0 до 1 включительно, описывающий принадлежность

события заданному классу. Момент, имеющий максимальную принадлежность событию «Прибытие волны» и превышающий согласованный порог уверенности, является точкой возникновения Р или S волны на предложенном отрезке времени.

Результаты

Так как точная структура нейронной сети, способная выполнять задачу отметки прибытия Р и S волн, неизвестна, то ее необходимо разработать и оптимизировать в процессе обучения сети для настройки точности определения событий и для снижения вычислительных затрат при работе сети. На начальном этапе проектирования системы можно воспользоваться методом «черного ящика» (Рисунок 4).



Рисунок 4 – Визуальное представление нейронной сети
 Figure 4 – Visual representation of a neural network

В работе [7] использована нейронная сеть для отметки Р волны на сырых данных, причем показано, что без очистки входных данных результат недостаточно точен. Следовательно, можно сделать вывод, что хоть нейронная сеть и может быть обучена с достаточным количеством примеров для работы с сейсмическим шумом, все же для получения наилучшего результата рекомендуется максимально снизить шумовые помехи.

Примером способа снижения полученного сейсмического шума служит метод частотно-разделенного подавления высокоамплитудных шумов в данных сейсморазведки [8], показавший себя с лучшей стороны при обработке полевых сейсмограмм с наземных сейсморазведочных работ в Западной Сибири.

Для обучения сети в качестве первичных данных используются размеченные экспертами сейсмограммы, на которых указан момент прибытия волны. Однако из-за специфики задачи число доступных примеров ограничено и может быть недостаточно для полного обучения нейронной сети. В связи с этим для дальнейшего развития и улучшения системы необходимо иметь возможность проводить обучение на неразмеченных данных. Следовательно, требуется применение дополнительных методов автоматической отметки прибытия волн для первоначальной оценки работы системы и обучения сети до необходимой точности.

Один из методов, способный автоматически определить момент прибытия Р или S волн – метод STA/LTA (Short Term Average through Long Term Average) [9]. Данный метод часто используется на практике для отметки периодов сейсмологических данных, имеющих аномальные характеристики. При применении STA/LTA вычисляется два

значения: STA – среднее значение амплитуд в краткий период времени, LTA – среднее значение амплитуд до краткого периода и за больший промежуток времени. Соотношение этих двух параметров сравнивается с предопределенным значением β . Если $STA/LTA > \beta$, то отмечается начало сейсмологического события, в противном случае отмечается конец события. Значение β для начала и конца события могут отличаться друг от друга.

Визуальное представление принципа работы STA/LTA представлено на Рисунке 5:

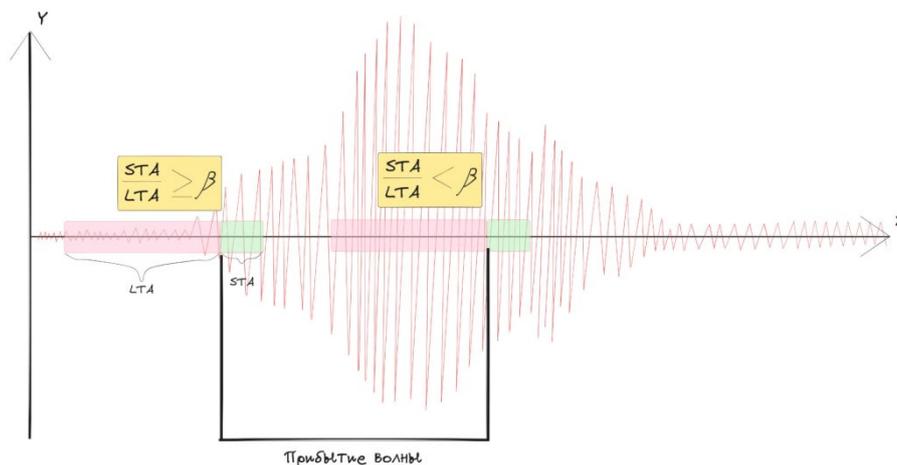


Рисунок 5 – Визуальное представление STA/LTA метода для отметки сейсмологического события

Figure 5 – Visual representation of the STA/LTA method for marking a seismic event

В случае решения задачи определения P и S волн, STA/LTA может быть использован разными способами:

- как метод отметки событий для анализа без определения нахождения P и S волн на них. Выполняется с целью сокращения занимаемой системой постоянной памяти при хранении секций времени без явных признаков сейсмологических событий;
- как непосредственный метод определения возникновения P и S волн.

При этом обозначенные выше методы могут быть использованы в комбинации друг с другом.

STA/LTA также имеет свои настраиваемые параметры [10], из-за чего возникает вопрос об используемых параметрах методов для каждого региона, территории, отдельного сейсмографа.

Другой метод автоматической отметки прибытия сейсмических волн предложен в работе [11]. Метод предлагает эффективный способ определения прибытия волн в сравнение с методом STA/LTA . Однако, как было отмечено в заключении исследования, для оптимального подбора типов вейвлетов и размера окон для построения ковариантных матриц требуется большое количество данных.

Обсуждение

Учитывая вышеописанные факторы и доступные к применению методы, для предполагаемой системы мониторинга сейсмологических событий выделяются следующие основные требования:

- система должна хранить информацию о каждом установленном сейсмографе: модель, местоположение, основные характеристики, параметры выходных сейсмограмм и т. д.;

- система должна хранить данные сейсмограмм, в которых отмечено сейсмологическое событие, следовательно, полученные от сейсмографов данные будут храниться в системе только в том случае, если на них действительно отображено сейсмологическое событие, с целью сокращения расходов на постоянное хранение полученных измерений;
 - хранение данных сейсмограмм должно быть эффективным, из-за чего требуется использование методов сжатия данных без потерь при хранении полученных измерений;
 - система обязана с максимальной возможной точностью определять, на каких сейсмограммах обозначено событие прибытия P или S волны, что предполагает минимизацию количества ложных положительных и ложных отрицательных результатов;
 - скорость определения события на входных данных должна быть близка к реальному времени (NRT: Near Real Time), из-за чего время между самым измерением сейсмограммы и получением отметки прибытия P и S волны должно быть минимальным;
 - сам процесс отметки прибытия P и S волн должен быть реализован при помощи трех методов: STA/LTA, метод с использованием вейвлетов и метод с использованием нейронной сети;
 - проведенные отметки должны быть доступны экспертам в визуальном представлении для их подтверждения или опровержения;
 - с прибытием критики от экспертов используемая нейронная сеть должна быть переобучена для соответствия новым отмеченным данным и повышения точности.
- С использованием предложенных выше требований составлена логическая схема системы мониторинга сейсмологических событий, представленная на Рисунке 6.

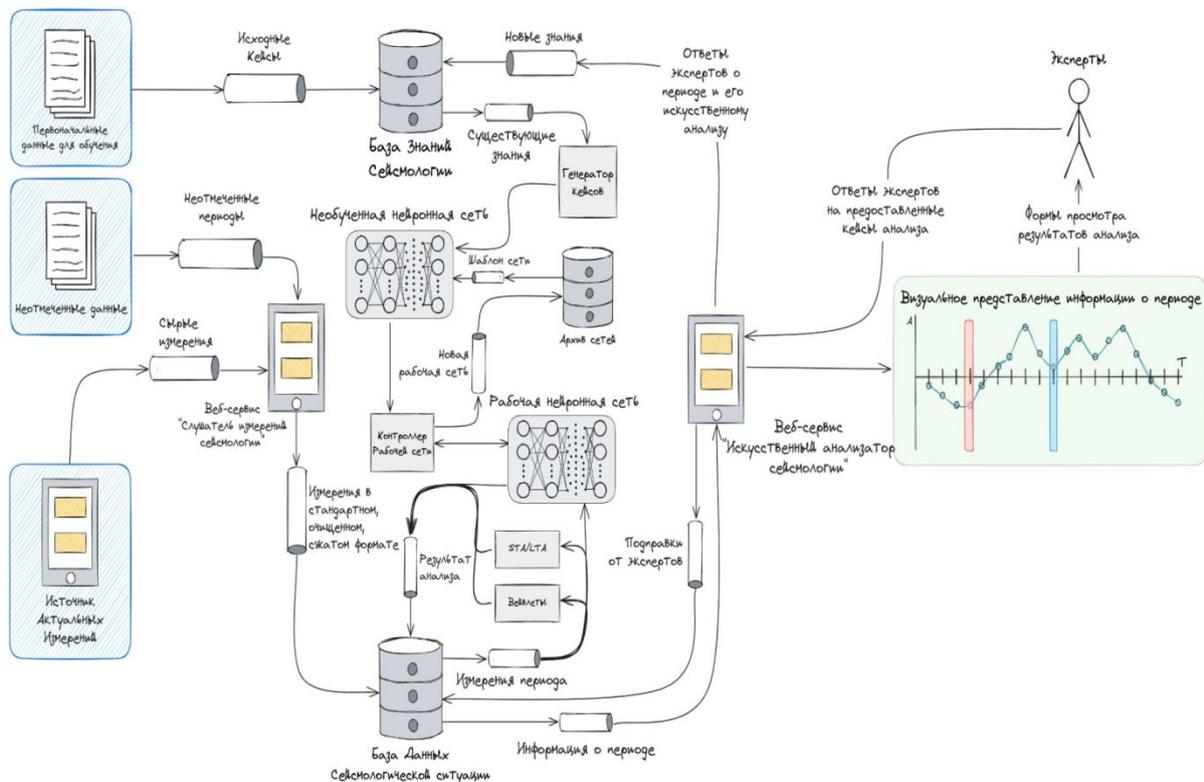


Рисунок 6 – Логическая схема системы мониторинга сейсмологических событий
 Figure 6 – Logical diagram of the seismological events monitoring system

На схеме выше обозначено три источника входных данных:

– первоначальные данные для обучения – отмеченный набор из сейсмограмм, с четко обозначенным временным промежутком прибытия Р и S волн, используется для обучения первой версии нейронной сети и для заполнения базы знаний;

– неотмеченные данные – архивные измерения с сейсмологических станций, на основе которых проводится тестирование системы на достаточность скорости обработки и при помощи которых проводится сравнение качества работы между нейронной сетью и другими автоматизированными методами;

– источник актуальных измерений – единый или разделенный источник, от которого поступают актуальные измерения с установленных сейсмографов.

Основные области хранения сведений в системе обозначены следующие:

– база Знаний сейсмологии – хранит помеченные и подтвержденные экспертами кейсы для обучения нейронной сети и проведения полной оценки работы системы;

– база Данных сейсмологической ситуации – место хранения обнаруженных сейсмологических событий вместе с соответствующими пометками прибытия Р и S волн, определенных при помощи автоматических методов и нейронной сети;

– архив сетей – содержит в себе сведения о всех предыдущих обученных нейронных сетях: их веса, структуры и полной оценке на основе базы знаний и автоматических методов.

Входной точкой системы является веб-сервис «Слушатель измерений сейсмологии», выполняющий следующие функции:

– первоначальная загрузка архивных данных для составления первоначального содержимого базы данных сейсмологической ситуации;

– постоянное принятие сырых данных с сейсмографов;

– сокращение сейсмического шума на полученных сейсмограммах;

– выявление областей сейсмологических событий для рассмотрения системы;

– сжатие найденных событий перед отправкой в БД.

Выходная точка системы: веб-сервис «Искусственный анализатор сейсмологии», выполняет следующие функции:

– предоставляет пользователям доступ к найденным событиям и проведенным отметкам поступления Р и S волн;

– дает возможность пользователям подтвердить или опровергнуть отметку прибытия Р и S волн;

– отгружает критику на базу знаний и базу данных для синхронизации сведений о событии в системе.

Для системы мониторинга сейсмологических событий также составлена физическая схема, представленная на Рисунке 7.

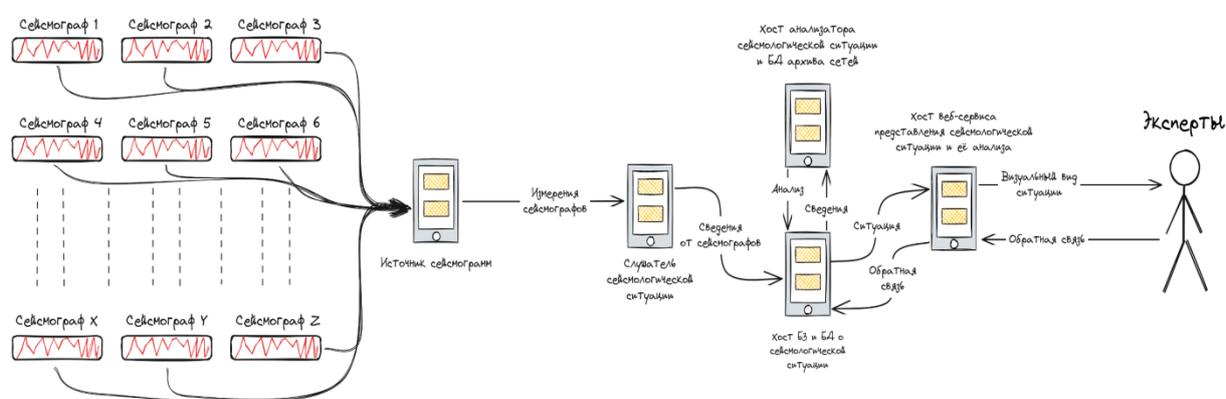


Рисунок 7 – Физическая схема системы мониторинга сейсмологических событий

Figure 7 – Physical diagram of the seismic events monitoring system

На Рисунке 7 системы представлены в виде единого сервера, однако на практике при работе с большими данными требуется распределенная архитектура с множеством отдельных физических вычислительных устройств, работающих в параллельном режиме.

Для максимальной пропускной способности, все отображенные устройства кластера должны быть соединены физически в единую локальную сеть. Беспроводное соединение допускается только на этапе передачи данных с сейсмографов на источник сейсмограмм.

Заключение

В ходе проведения исследования спроектирована теоретическая модель системы мониторинга сейсмических событий для автоматической отметки прибытия Р и S волн на основе нейронной сети. В состав модели включены: теоретические основы поставленной задачи, требования к самой системе, логическая и физическая схемы системы.

В дальнейшем предполагается реализация данной модели для проверки ее эффективности, разработки и обучения первоначальных нейросетевых моделей и автоматизированных методов для работы с некачественными данными.

После подтверждения корректности и достаточной скорости работы системы в режиме, близком к работе в реальном времени (Near real time, NRT-режиме), с включенной обработкой исходных «сырых» данных, модель предполагается расширить для включения функции определения эпицентров землетрясений на основе отмеченных сейсмологических волн.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Сафонов Д.А. Сейсмическая активность Приамурья и Приморья. *Геосистемы переходных зон*. 2018;2(2):104–115. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.2.104-115>
Safonov D.A. Seismic Activity of the Amur and Primorye. *Geosystems of Transition Zones*. 2018;2(2):104–115. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.2.104-115>
2. Диденко А.Н., Трофименко С.В., Быков В.Г., Меркулова Т.В., Гильманова Г.З. *Оценка сейсмического риска территории континентальной части юга Дальнего Востока России*. Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН; 2018. 82 с.
Didenko A.N., Trofimenko S.V., Bykov V.G., Merkulova T.V., Gil'manova G.Z. *Seismic Risk Evaluation Continental Part of the Southern Far East of Russia Territory*. Khabarovsk: ITiG FEB RAS; 2018. 82 p. (In Russ.).
3. Пупатенко В.В., Рябинкин К.С. О перспективах сейсмологического мониторинга Хабаровского края и близлежащих территорий. *Региональные проблемы*. 2024;27(2):46–48. <https://doi.org/10.31433/2618-9593-2024-27-2-46-48>
Pupatenko V.V., Ryabinkin K.S. On the Prospects for Seismological Monitoring of Both the Khabarovsk and Nearby Territories. *Regional'nye problemy*. 2024;27(2):46–48. (In Russ.). <https://doi.org/10.31433/2618-9593-2024-27-2-46-48>
4. Довгань В.И., Фролова А.Г. К вопросу локализации землетрясений по записям цифровой системы сейсмометрических наблюдений на Токтогульской плотине. *Вестник Института Сейсмологии Национальной Академии Наук Кыргызской Республики*. 2017;(1):28–37.
Dovgan V., Frolova A. To Problem of Earthquakes Localization According to Records of the System of Seismometry Observations on the Toctogul Dam. *Vestnik Instituta*

- Seismologii Natsional'noi Akademii Nauk Kyrgyzskoi Respubliki*. 2017;(1):28–37. (In Russ.).
5. Rojas R. *Neural Networks: A Systematic Introduction*. Berlin, Heidelberg: Springer; 1996. 502 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-61068-4>
 6. Быховская А.С. Обнаружение и идентификация сигналов сейсмической волны с использованием нейронной сети. *Chronos*. 2020;(2):4–6.
 7. Зверев М.А. Метод частотно-разделенного подавления высокоамплитудных шумов в данных сейсморазведки. *Вестник Югорского государственного университета*. 2006;(4):36–40.
 8. Choubik Yo., Mahmoudi A., Himmi M.M., Moudnib L.E. STA/LTA Trigger Algorithm Implementation on a Seismological Dataset Using Hadoop MapReduce. *IAES International Journal of Artificial Intelligence*. 2020;9(2):269–275. <https://doi.org/10.11591/ijai.v9.i2.pp269-275>
 9. Trnkoczy A. Understanding and Parameter Setting of STA/LTA Trigger Algorithm. In: *New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2)*. Postdam: IASPEI, GFZ German Research Centre for Geosciences; 2012. P. 1–20. https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2_IS_8.1
 10. Веревкин А.П., Казбулатов И.Г. Метод распознавания времени прибытия Р- и S-волн микросейсмических событий с использованием вейвлетов. *Территория Нефтегаз*. 2015;(5):20–26.
Verevkin A.P., Kazbulatov I.G. A Wavelet Transform Method to Detect P- And S-Phases Arrival Times Of Microseismic Events. *Oil and Gas Territory*. 2015;(5):20–26. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Вихтенко Элина Михайловна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент высшей школы «Кибернетики и цифровых технологий» Тихоокеанского государственного университета, Хабаровск, Российская Федерация.
e-mail: 004184@togudv.ru
ORCID: [0000-0002-7152-2311](https://orcid.org/0000-0002-7152-2311)

Ellina M. Vikhtenko, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Docent, Associate Professor of the Higher School of Cybernetics and Digital Technologies, Pacific National University, Khabarovsk, the Russian Federation.

Лукашевич Сергей Константинович, магистрант Тихоокеанского государственного университета, Хабаровск, Российская Федерация.
e-mail: 2020102045@togudv.ru

Sergey K. Lukashevich, Master's Degree student, Pacific National University, Khabarovsk, the Russian Federation.

Манжула Илья Сергеевич, научный сотрудник лаборатории «Информационные технологии», Вычислительный центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, Хабаровск, Российская Федерация.
e-mail: manzhula_94@mail.ru
ORCID: [0000-0002-1298-1470](https://orcid.org/0000-0002-1298-1470)

Ilya S. Manzhula, Research Officer at the Laboratory of Information Technologies, Computing Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 22.04.2025; одобрена после рецензирования 19.05.2025; принята к публикации 05.06.2025.

The article was submitted 22.04.2025; approved after reviewing 19.05.2025; accepted for publication 05.06.2025.