

© Авторы, 2025 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors, 2025.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 550.8;004.8;004.93

<https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.4.410-419>
<https://www.elibrary.ru/reyvch>

Определение оптимальной длительности временного окна для выделения аномалий акустической эмиссии перед сильными землетрясениями на Камчатке

Ю. И. Сенкевич[@], М. А. Мищенко

^{@E-mail:} senkevich@ikir.ru

*Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
Паратунка, Россия*

Резюме. На Камчатке в ходе многолетнего мониторинга накоплен обширный эмпирический материал, отражающий динамику параметров акустической эмиссии (АЭ) приповерхностных осадочных пород на этапе подготовки сильных землетрясений. Статья посвящена изучению характеристик акустического сигнала в диапазоне частот от 10 Гц до 10 кГц, источником которого являются приповерхностные осадочные породы. Сформулирована гипотеза, согласно которой фрагменты АЭ, длительностью от нескольких часов до нескольких суток, перед сильными землетрясениями на Камчатке содержат информативные признаки подготовки сейсмических событий. Выполненное для верификации данной гипотезы исследование направлено на идентификацию специфического класса аномалий характеристик АЭ, ассоциированных с возникновением сильных сейсмических событий. Ключевой проблемой в рамках данной задачи является определение временных границ интервалов проявления указанных аномалий. Обнаружено значительное многообразие форм аномалий и их временной протяженности, обусловленное нелинейностью процессов генерации АЭ и воздействием внешних природных факторов. В таких условиях выделение искомым признаков параметрической связи наблюдаемых аномалий АЭ со следующими за ними землетрясениями существенно зависит от правильно выбранных границ интервалов обработки фиксируемого сигнала. Изложен подход к решению задачи определения границ интервала. Представлено практическое доказательство существования класса аномалий, связанных с подготовкой землетрясений. Разработана методика поиска оптимального временного интервала выделения таких аномалий с использованием методов искусственного интеллекта.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, приповерхностные породы, предсейсмические аномалии, нейронные сети

Searching the optimal time window duration for detecting acoustic emission anomalies preceding major earthquakes on Kamchatka

Yury I. Senkevich[@], Mikhail A. Mishchenko

^{@E-mail:} senkevich@ikir.ru

Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, FEB RAS, Paratunka, Russia

Abstract. Extensive empirical data have been accumulated during long-term monitoring on Kamchatka, which reflect the dynamics of the parameters of the acoustic emission (AE) of near-surface sedimentary rocks during the initiation of strong earthquakes. The article is devoted to the study of the characteristics of the acoustic signal in the frequency range of 10 Hz to 10 kHz, the source of which is near-surface sedimentary rocks. A hypothesis was formulated suggesting that fragments of the AE signal lasting from several hours to several days contain features indicating the initiation of seismic events preceding strong earthquakes in Kamchatka. To verify this hypothesis, a study was carried out to identify a specific class of anomalies in the parameters of AE signals correlated with the occurrence of strong seismic events. The key challenge in this task was determining the temporal boundaries of the intervals during which these

anomalies occur. A significant diversity in the forms of anomalies and their temporal duration was discovered, caused by the nonlinearity of AE generation processes and the influence of a wide spectrum of external natural factors. Under such conditions, the successful identification of the desired features of the parametric relationship between the observed AE anomalies and subsequent earthquakes depends strongly on the proper selection of boundaries of the signal processing intervals. The study presents the solution to the problem of determining interval boundaries, provides evidence for the existence of a class of anomalies associated with the initiation of earthquakes, and introduces a method for finding the optimal time interval for identifying such anomalies using artificial intelligence.

Keywords: acoustic emission, near-surface rocks, preseismic anomalies, neural networks

Для цитирования: Сенкевич Ю.И., Мищенко М.А. Определение оптимальной длительности временного окна для выделения аномалий акустической эмиссии перед сильными землетрясениями на Камчатке. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 4, с. 410–419. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.4.410-419>; <https://www.elibrary.ru/reyvch>

For citation: Senkevich Yu.I., Mishchenko M.A. Searching the optimal time window duration for detecting acoustic emission anomalies preceding major earthquakes on Kamchatka. *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 4, pp. 410–419. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.4.410-419>; <https://www.elibrary.ru/reyvch>

Финансирование и благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания Института космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН (№ темы 124012300245-2).

Funding and Acknowledgements

The study was carried out within the framework of the state task of the Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation of FEB RAS (No. 124012300245-2).

Введение

Акустическая эмиссия (АЭ) в осадочных породах генерируется в результате нелинейной перестройки элементов мелкозернистой структуры сыпучих грунтов, обусловленной деформационными процессами и явлением дилатансии [1–3]. Деформационные процессы, инициируемые тектоническими движениями, поддерживают неустойчивое напряженно-деформированное состояние среды в верхних слоях литосферы [4]. Такое состояние среды способно вызывать мгновенную реакцию осадочных пород даже на слабое воздействие поверхностных волн, порождаемых сейсмическими процессами. Реакция проявляется как заметное изменение характеристик АЭ, таких как количество импульсов, распределение их по длительности, амплитуде и скважности. В определенных случаях подобные проявления удается связать с отдельными сейсмическими событиями [3–8]. В ходе многолетних наблюдений, проводимых в лаборатории акустических исследований ИКИР ДВО РАН, удалось обнаружить связь изменений характеристик АЭ с моментами возникновения

сильных землетрясений на Камчатке [7–11]. Установленный факт лег в основу поиска и обоснования предвестников землетрясений на основе наблюдаемых изменений характеристик АЭ [9–12].

Известная проблема поиска устойчивых признаков, указывающих на подготовку землетрясения, состоит в нелинейной реакции поверхностных слоев литосферы на сейсмические процессы [2, 3, 5, 6]. Это отражается на характеристиках получаемых сигналов и, как следствие, на характеристиках АЭ. Поэтому целью проведенных исследований был поиск скрытых закономерностей в изменчивости характеристик АЭ на различных интервалах наблюдения, измеренных за фиксированные периоды продолжительностью от нескольких часов до нескольких суток. Характерные особенности сигнала АЭ, полученные на интервалах наблюдения непосредственно перед землетрясениями, в отличие от характеристик сигнала АЭ, наблюдаемых на интервалах, значительно удаленных по времени от моментов начала и окончания землетрясений, далее будем называть аномалиями акустической эмиссии.

Материалы и метод

Для изучения аномалий АЭ был разработан подход к представлению серии последовательных оценок характеристики сигнала на определенном временном интервале в виде отображения, подготовленного к дальнейшей обработке и анализу с использованием нейронных сетей. Далее поясним детально причины и сущность применяемого подхода.

Данное исследование проводилось в лаборатории акустических исследований ИКИР ДВО РАН на основе базы данных записей сигнала АЭ, накопленных в период с сентября 2016 по декабрь 2019 г. Сигнал АЭ регистрировался в приповерхностных породах при помощи пьезокерамического гидрофона, установленного в искусственном водоеме в пункте наблюдений «Карымшина» и обеспечивающего прием сигнала в диапазоне частот 10 Гц – 10 кГц. Частота оцифровки регистрируемого сигнала составляла 48 кГц. Расчетный радиус полусферы приема в принимаемом частотном диапазоне составляет от 10 до 30 м. Основная часть принимаемых источников АЭ описывается свойствами фракций геологической колонки, представляющих приповерхностные осадочные породы.

На рис. 1 приведены случайно выбранные файлы из базы данных, в которой хранятся последовательно записанные пятнадцатиминутные фрагменты записи сигнала АЭ, каждый из

которых представляет собой последовательность акустических импульсов. По каждому импульсу проводится измерение различных его параметров (амплитуда, длительность, межимпульсный интервал). На каждом фрагменте можно выделить более тысячи отдельных импульсов (2262 и 3454 импульса на рис. 1 а, б соответственно), что позволяет получать параметрические оценки с достаточной статистикой, содержащей необходимую информацию о параметре распределения на каждом таком фрагменте сигнала. Например, за сутки можно получить 96 таких оценок и проследить изменчивость выбранной характеристики за данный период наблюдений. Поэтому для дальнейшего анализа изменчивости характеристик АЭ на интервале наблюдения применялся метод статистической оценки изменчивости выбранного параметра.

Таким образом, сигнал АЭ на интервале наблюдения рассматривается как поток акустических импульсов с изменяющимися во времени статистическими характеристиками.

Разные фрагменты записи сигнала значительно различаются по структуре полученных нами параметрических оценок отдельно для каждой из характеристик сигнала АЭ, таких как амплитудное распределение, распределение длительности импульсов и распределение межимпульсного интервала. Далее мы представим результаты обработки и анализа изменчивости только амплитудного распределения как

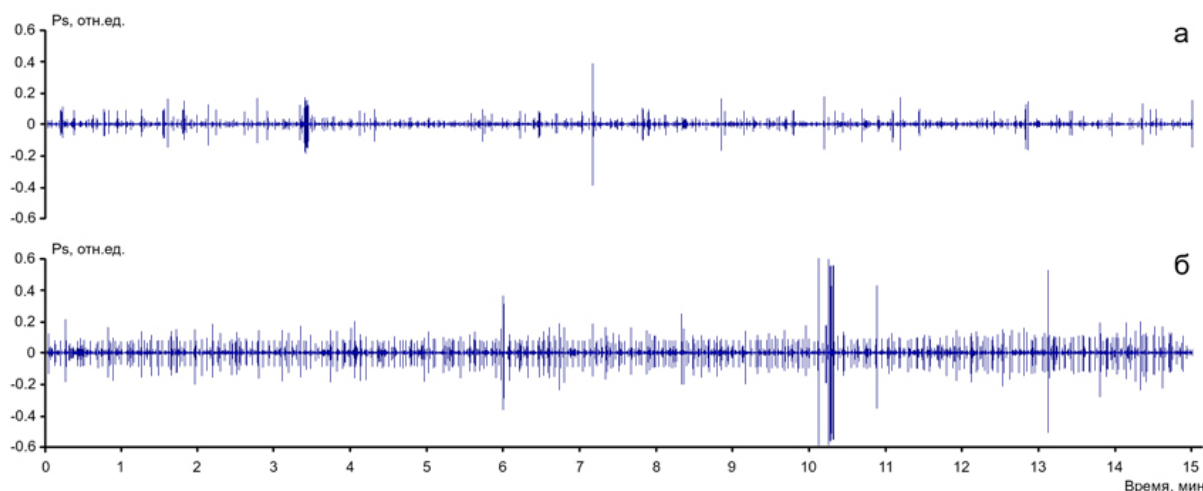


Рис. 1. Фрагменты записи сигнала акустической эмиссии, зарегистрированного 10 января (а) и 25 сентября (б) 2025 г.

Fig. 1. Fragments of the acoustic emission signal recorded on January 10 (a) and September 25 (б), 2025.

наиболее показательного примера для демонстрации предложенного подхода.

На графиках рис. 2 а, б приведены гистограммы распределения амплитуды импульсов, выделенных с фрагментов записи рис. 1 а, б сигнала акустической эмиссии.

Записи сигнала акустической эмиссии, представленные на фрагментах рис. 1 а, б, заметно различаются по картине распределения амплитуд импульсов, что отражается на гистограммах на рис. 2 а, б. Однако чаще всего графическое представление распределений визуальнo трудно различимо даже при сравнении большого числа последовательных фрагментов сигнала. На практике это проявляется

в сложности поиска качественных различий при инструментальном сравнении результатов обработки сигналов и их идентификации. В дальнейшем это серьезно затрудняет задачу достоверного выделения интервалов со специфической изменчивостью выбранной характеристики сигнала, связанной с землетрясением и не связанной с ним. Для выхода из создавшейся ситуации была предпринята попытка анализа трехмерных графических отображений (рис. 3).

На рис. 3 приведены последовательно записанные пятнадцатиминутные фрагменты сигнала АЭ в виде поочередно выстроенных нормированных гистограмм распределения

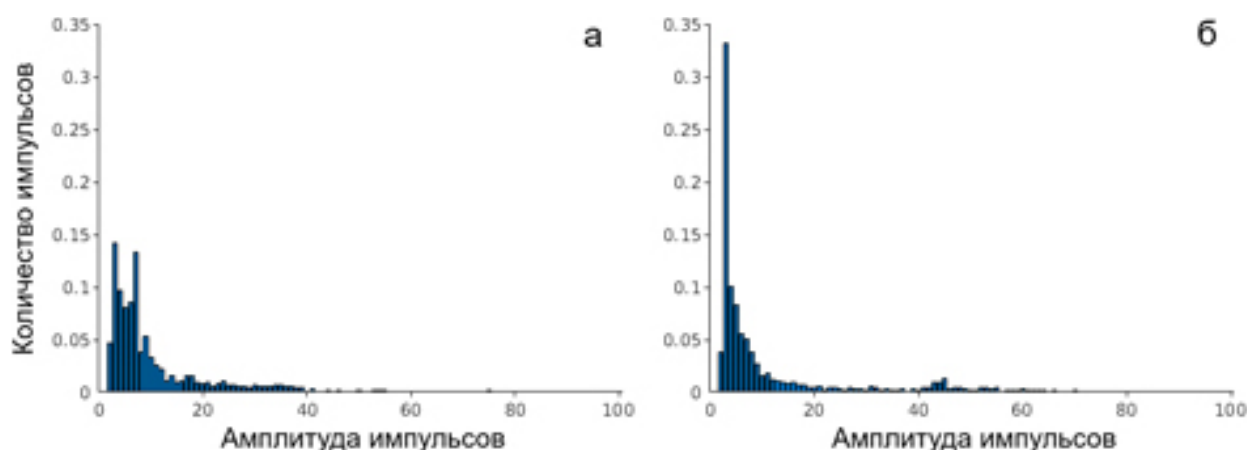


Рис. 2. Гистограммы распределения амплитуды импульсов сигнала акустической эмиссии, построенные по фрагментам записей на рис. 1 а, б.

Fig. 2. Histograms of the acoustic emission pulses amplitude distribution, constructed from fragments of the records in Fig. 1 а, б.

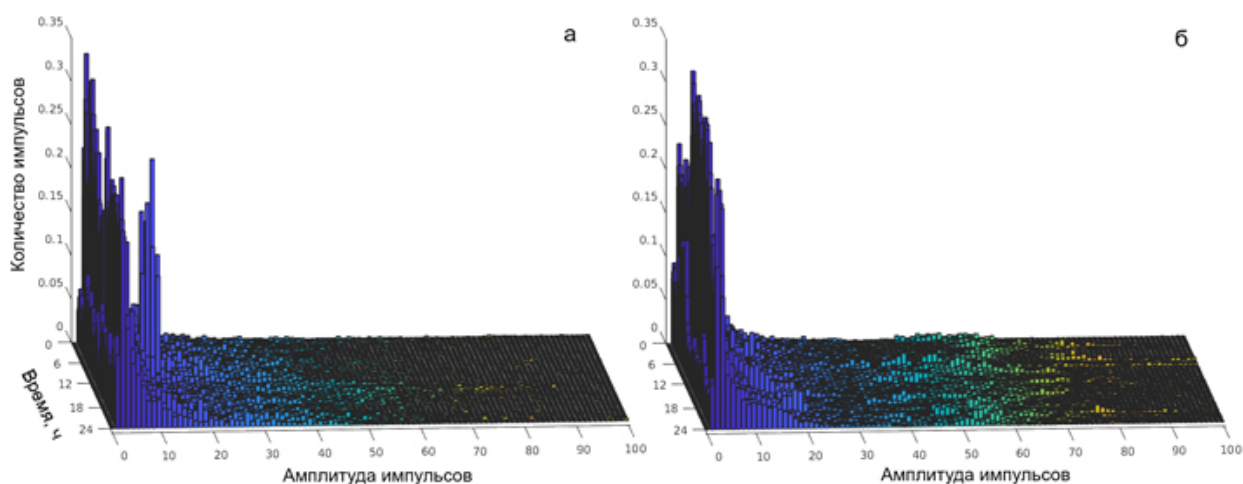


Рис. 3. Пример формирования массива данных динамики распределения амплитуды импульсов сигнала АЭ за сутки 10 января (а) и 25 сентября (б) 2025 г.

Fig. 3. An example of the formation of the data array of the distribution dynamics of the amplitude of the acoustic emission signal pulses over a day: January 10 (а) and September 25 (б), 2025.

амплитуд импульсов. При таком представлении картина изменчивости характеристики сигнала на суточном интервале обработки сигнала АЭ более наглядна. Такое графическое отображение лучшим образом отражает динамику амплитудного распределения на интервале обработки. Однако как визуальный, так и инструментальный анализ еще более усложнился.

Решение возникшей проблемы с анализом трехмерных отображений было подсказано в ходе изучения высококачественной обработки и классификации изображений современными программно-ориентированными архитектурами нейронных сетей. Такие нейронные сети широко используются в различных научных областях для идентификации, кластеризации и классификации 3D-изображений. Поэтому уже полученные массивы данных динамики распределения амплитуды импульсов сигнала АЭ были трансформированы в матричные представления 3D-отображений. На рис. 4 а, б представлена пара таких отображений, полученных на основе данных с рис. 3. Более детально формирование 3D-матриц отображений и их использование для идентификации аномалий АЭ перед сильными землетрясениями представлено в описании патента [9, 12].

Оставалась нерешенной еще одна важная задача – определение оптимального интервала для выделения аномалий изменчивости характеристик АЭ, связанных с землетрясениями. Решению этой задачи и посвящено настоящее исследование.

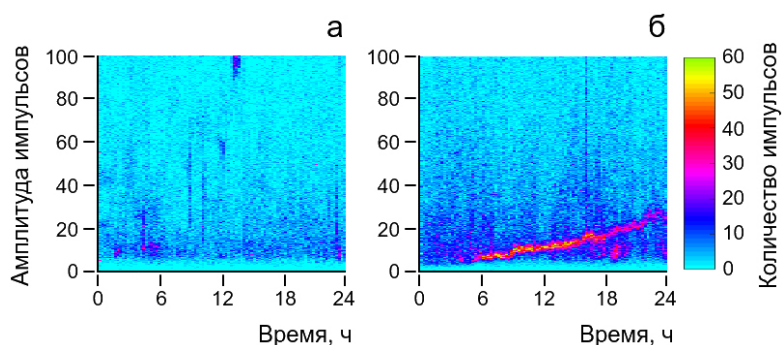


Рис. 4. Графическое представление массивов данных динамики распределения амплитуды импульсов сигнала АЭ (см. рис. 3 а, б), подготовленное для нейронной сети.

Fig. 4. Graphical representation of data arrays of the distribution of the dynamics of the pulse amplitude of the acoustic emission signal pulses (see Fig. 3 а, б), prepared for a neural network.

Постановка задачи исследования

Получен сигнал АЭ $s(t)$, определенный на временном интервале $t \in [0, T]$. Требуется найти временной интервал $\tau = [t_s, t_e]$, где $0 \leq t_s < t_e \leq T$, на котором заданный критерий качества $Q(\tau)$ достигает своего максимального значения. Здесь t_s, t_e – начало и конец искомого интервала. Критерий $Q(\tau)$ оценивает степень выраженности аномалии в динамике определенной характеристики сигнала $s(t)$, ассоциированной с наблюдаемым сейсмическим событием. Интервал наблюдения $[0, T]$ избыточен и гарантированно покрывает всю значимую часть аномалии, включая ее полное проявление.

Принимается условие о привязке окончания временного окна для искомых интервалов выделения аномалий АЭ к моментам, связанным с соответствующими землетрясениями: ($t_e = T$), следовательно $\tau = [t_s, T]$. Тогда целевую функцию поиска лучшего интервала выделения аномалий АЭ можно представить как

$$\tau^* = \max_{\tau \in [0, T]} Q(\tau). \quad (1)$$

В условиях влияния на результат вычисления (1) неопределенного числа факторов, в первую очередь нелинейности сейсмических процессов, оптимальным значением интервала правомерно принять некоторое среднее его значение $\tau_{opt} = \langle \tau^* \rangle$ среди множества полученных значений.

Ограничения для решения задачи следующие. Применяется оценка степени различимости объектов, сформированных на базе преобразования фрагментов сигнала $s(t)$, на равных интервалах τ . Интервалы, связанные с сейсмическим событием, объединены во множество $[\tau^S]$. Интервалы, не связанные с сейсмическими событиями, объединены во множество $[\tau^N]$. Должно выполняться условие непересечения любых фрагментов сигнала, входящих во множества. Фрагменты сигнала обоих множеств с помощью структурного преобразования переводятся в матричное представление, отражающее изменчивость характеристик

сигнала [10]. Структурное преобразование включает два этапа: первый – вычисление расчленения выбранного параметра сигнала для каждого фрагмента множеств $[\tau^S]$ и $[\tau^N]$ в виде множеств векторов $[v^S]$ и $[v^N]$ соответственно; второй – деление множеств векторов $[v^S]$ и $[v^N]$ на $k = \tau^*/\mu$ (μ – минимальное значение интервала записи сигнала АЭ, равное 15 мин) подмножеств векторов и составление матриц-образов для каждого из полученных подмножеств. В результате структурного преобразования формируются два множества объектов S и N , соответствующие исходным множествам фрагментов сигнала, трансформированным в трехмерные отображения. Теперь качество выделения аномалий АЭ на заданном интервале τ^* можно оценить через результат решения задачи классификации объектов S и N .

Пусть задана фиксированная модель классификатора f . $S = \{S_0, S_1, \dots, S_k\}$ и $N = \{N_0, N_1, \dots, N_k\}$ – наборы объектов, подготовленные структурным преобразованием для серии интервалов $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k$ ($\tau_0 < \tau_1 < \dots < \tau_k$) для обоих классов. $D = \{s_i, n_i\}_{i=1}^k$ – датасеты с объектами, собранные для классификации с использованием нейросети, где k – число пар обучающих примеров. Тогда целевую функцию поиска лучшего интервала выделения аномалий АЭ (1) можно заменить функцией поиска индекса i , соответствующего интервалу τ^* . Требуется определить индекс с максимальным значением метрики качества классификации J для фиксированной модели классификатора $f(2)$:

$$i^* = \arg \max_{i \in [0, k]} J(f(d_i)). \quad (2)$$

Методика экспериментов

При поиске оптимального интервала выделения аномалий АЭ, связанных с землетрясениями, принято утверждение, что в основе главных причин, влияющих на изменение характеристик АЭ в осадочных породах, лежит явление дилатансии – процесс увеличения объема породы перед разрывом, который вызван образованием микротрещин под действием высокого напряжения, и другими разруше-

ниями приповерхностных пород в периоды подготовки землетрясений [2, 3]. Изменения характеристик сигнала в периоды, предшествующие землетрясениям, проявляются как аномалии по отношению к периодам, удаленным от моментов подготовки землетрясений, когда изменчивость характеристик выражена слабее или вызвана другими причинами внешнего воздействия на приповерхностные породы. В результате воздействий разной степени параметры АЭ, такие как амплитуда, форма импульсов и межимпульсный интервал, меняются. Для выявления возможной специфики такой изменчивости выполняется препроцессинг групп фрагментов сигнала в виде следующей последовательности операций:

1. Эмпирически выбирается последовательность k – значений временных интервалов, удовлетворяющих условию поставленной задачи исследования.

2. Из регионального сейсмического каталога [13] отбираются m землетрясений, для которых выполняется условие (3):

$$D/R_D < 1, R_D = 10^{0.43(K_S - 4.6)/1.5} \quad (3)$$

где R_D – радиус зоны Добровольского, D – расстояние от пункта наблюдений до гипоцентра землетрясения, K_S – энергетический класс землетрясения.

3. Из непрерывного сигнала извлекаются две группы его фрагментов различной длительности по k серий каждая. Каждая серия первой группы составляется из фрагментов, привязанных ко времени начала одного из m землетрясений. Каждая серия второй группы составляется из фрагментов, не связанных с землетрясениями. В результате будет получено $2 \times k \times m$ фрагментов.

4. Выполняется препроцессинг всех полученных фрагментов применением структурного преобразования [9, 10]. В результате получаем отображения, отражающие динамику характеристик АЭ на заданных по длительности фрагментах сигнала.

5. Упорядоченные отображения дополняются соответствующими метками, указывающими на связь этих объектов с землетрясениями или отсутствием такой связи.

Соответственно, формируются два класса объектов. Объекты собираются в датасеты с использованием программы из библиотеки глубокого обучения нейронных сетей Keras.

6. Объекты в датасетах перемешиваются, датасеты подвергаются очистке от выбросов, выравниваются по числу элементов в классах путем аугментации. Перечисленные операции проводятся с использованием программ из библиотеки глубокого обучения нейронных сетей Keras.

7. Определяется степень близости паттернов отображений к определенному классу для каждой серии с применением подготовленных алгоритмов детектирования по классам. Проводится кластеризация, обучение и тестирование нейросети. Для детектирования синтезирована нейронная сеть – классификатор на основе архитектуры RedNet, состоящий из трех остаточных блоков и двух полносвязных слоев. Архитектура нейронной сети собрана в результате решения задачи оптимизации качества классификации отображений в ходе предшествующих исследований [10–12].

8. Результаты детектирования сравниваются по метрикам правильного и ошибочного выбора элементов по классам для каждой серии. Делается выбор серии с лучшим показателем средней точности распознавания.

Подготовка и обработка данных

Для решения поставленной задачи использовалась база данных записей сигнала АЭ, накопленных в период с сентября 2016 по декабрь 2019 г. Также из регионального сейсмического каталога [13] были отобраны землетрясения с энергетическим классом $K_s \geq 10,0$, произошедшие в согласованный с базой данных период. С учетом временных окрестностей этих землетрясений на основе записей сигнала АЭ строились матрицы отображений (графические изображения, такие, как на рис. 4), которые отражают динамику распределения амплитуды импульсов.

Для обучения нейронной сети было определено два класса матриц отображений. Первый класс – pred объединяет элементы,

представляющие фрагменты сигнала, предшествующие моментам начала каждого из выбранных землетрясений на заданных временных интервалах в 1, 3, 10 и 20 сут (рис. 5). Второй класс – fone объединяет элементы с аналогичной предыдущим элементам длительностью фрагментов сигнала АЭ, выбранных таким образом, чтобы не перекрывать временные интервалы элементов предыдущих последовательностей. Согласно ограничениям при постановке задачи исследований, подмножества элементов классов не пересекаются ($\{upre\} \cap \{ufon\} = \emptyset$). Исходные матрицы отображений имеют размерность 256×256 пиксел. В ходе предобработки отображения функцией сплайн аппроксимации преобразуются к стандарту изображений нейросетевой обработки с архитектурой ResNet – 64×64 , из которых и формируется датасет.

На рис. 6 приведен пример подготовленных отображений классов pred и fone на интервале наблюдений одни сутки. Распределение отобранных фрагментов по классам и сериям представлено в табл. 1.

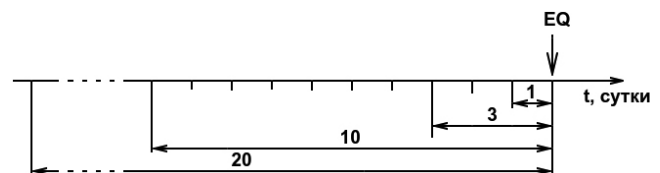


Рис. 5. Иллюстрация выбора временного интервала фрагмента сигнала в окрестности землетрясения для проведения эксперимента.

Fig. 5. Illustration of the selection of the time interval of a signal fragment in the vicinity of an earthquake for conducting an experiment.

Таблица 1. Распределение фрагментов сигнала АЭ по группам

Table 1. Distribution of AE signal fragments by groups

Название класса	Серия, сутки	Количество элементов в серии
pred	1	31
	3	28
	10	31
	20	31
fone	1	1138
	3	305
	10	66
	20	19

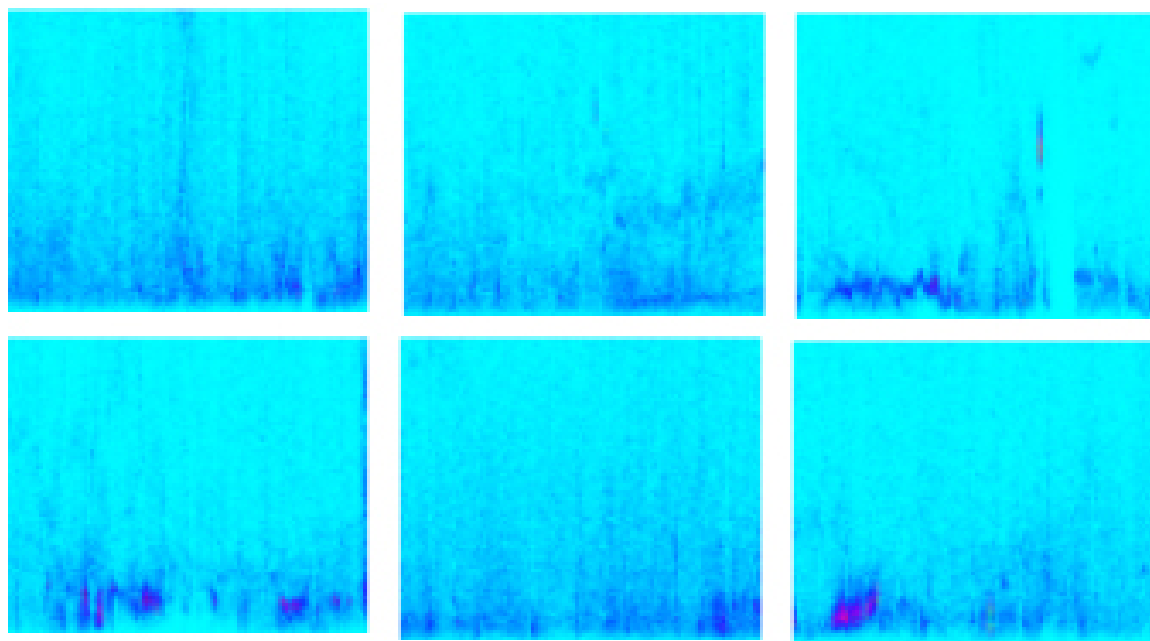


Рис. 6. Примеры отображений класса pred (верхний ряд) и класса fone (нижний ряд).
Fig. 6. Examples of mappings of the “pred” class (top row) and the “fone” class (bottom row).

В табл. 2 представлены результаты проведения экспериментов по приведенной выше методике. В ней по строкам показаны значения долей верно распознанных элементов классов pred и fone, а также ошибочно обнаруженные элементы для каждого из классов соответственно.

Таблица 2. Результаты идентификации элементов классов pred и fone с использованием нейросетевой обработки и классификации для всех серий каждой из групп

Table 2. Results of the identification of elements of the “pred” class and the “fone” class using neural network processing and classification for all series of each group

Индекс	Серия (сутки)	Доля верно распознанных классов (доля ошибочно распознанных классов)	Средняя точность распознавания, %
0	1	0.96 (0.04) 0.97 (0.03)	96
1	3	0.92 (0.08) 0.95 (0.05)	94
2	10	0.00 (1.00) 1.00 (0.00)	51
3	20	0.94 (0.06) 0.97 (0.03)	96

Примечание. Верхняя строка – класс pred, нижняя – класс fone.

Note. Top row is the “pred” class, bottom row is the “fone” class.

Анализ результатов и выводы

При постановке задачи теоретически было показано, что в силу неявного характера изменений характеристик АЭ при выборе лучшего интервала для обнаружения предсейсмических аномалий целесообразно использовать показатель индекса качества классификации, который в нашем случае представлен средней точностью распознавания.

Разработанная методика экспериментов позволила выявить лучшие интервалы для выделения аномалий характеристик АЭ, непосредственно предшествующих сильным землетрясениям, отобранным по значениям показателя радиуса Добровольского. Так, лучший показатель средней точности распознавания классов (96 %) получен в серии с данными на интервалах 1 и 20 сут. В серии с данными на интервале в 10 сут результат распознавания самый низкий – отображения не распознаются и алгоритм относит их полностью к классу fone. Попытки дополнительной очистки классов от возможных выбросов в составе датасетов не привели к улучшению показателей.

На основании полученных результатов можно предположить, что на интервалах наблюдений сигнала АЭ до 20 сут включительно

существуют временные рамки, которые наиболее предпочтительны (1, 3 и 20 сут) для поиска и выделения аномалий АЭ, предшествующих сильным землетрясениям. Согласно поставленному в задаче исследования критерию, эти временные периоды являются оптимальными. В то же время существует период в 10 сут, который дает негативный результат в ходе обнаружения и классификации отображений динамики амплитудных распределений АЭ. Для уточнения вероятностных границ такого интервала следует провести дополнительные исследования. Но уже сейчас можно сказать, что изменение интервала наблюдения от 1 до 20 сут не отвечает закону прямой пропорциональности при распознавании классификатора на базе испытанной архитектуры нейронной сети.

С одной стороны, полученное высокое значение показателя качества классификации, соответствующее интервалу наблюдений в 20 сут, наводит на мысль о возможности поиска информативных фрагментов сигнала АЭ с еще большими значениями интервалов. С другой стороны, полученный «провал» в значении критерия качества классификации на интервале в 10 сут и его повышение на периоде 20 сут может указывать на возможность обнаружения информативных аномалий АЭ, непосредственно не привязанных своей конечной границей к моментам начала землетрясения. Такая гипотеза потребует дополнительных исследований с применением, например, скользящих окон.

В целом в результате проведенного исследования удалось показать существование конечных интервалов наблюдений с лучшими качественными показателями выделения аномальных характеристик сигнала АЭ, которые наблюдаются в периоды, предшествующие началу сильных землетрясений на Камчатке, а также показать работоспособность представленного подхода к изучению сигналов АЭ и эффективность разработанной методики проведения экспериментов.

Список литературы

1. Спивак А.А., Рыбнов Ю.С. **2021**. Акустические эффекты сильных землетрясений. *Физика Земли*, 1: 41–50. doi:10.31857/S0002333721010099; EDN: PPIWNS
2. Сычев В.Н., Богомолов Л.М. **2013**. Потенциал методов нелинейной динамики для анализа геофизических рядов и сейсмичности. В кн.: *VI Международная конференция: Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений, Паратунка, Россия, 9–13 сентября*, с. 77. URL: <https://www.ikir.ru/export/sites/ikir/ru/Events/Conferences/2013-VI-international/thesis-19.08.2013.pdf> (дата обращения: 01.08.2025).
3. Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А. **2012**. Развитие приповерхностных зон дилатансии как возможная причина аномалий в параметрах сейсмической эмиссии перед сильными землетрясениями. *Тихоокеанская геология*, 31(1): 96–106. EDN: OXSTWD
4. Segall P. **2010**. *Earthquake and volcano deformation*. Princeton, NJ, Princeton Univ. Press, xxiii+432 p.
5. Чеботарева И.Я., Володин И.А., Дрягин В.В. **2017**. Акустические эффекты при деформировании структурно неоднородных сред. *Акустический журнал*, 63(1): 84–93. doi:10.7868/S0320791916060046; EDN: YVXCUN
6. Соболев Г.А., Пономарев А.В. **2003**. *Физика землетрясений и предвестники*. М.: Наука, 270 с. EDN: RVEBFL
7. Муратов П.В., Руленко О.П., Марапулец Ю.В., Солодчук А.А. **2018**. Электрический и акустический отклик приповерхностных осадочных пород на прохождение сейсмических волн от землетрясений. *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 25(5): 62–73. doi:10.18454/2079-6641-2018-25-5-62-73; EDN: YSQAGL
8. Марапулец Ю.В., Шевцов Б.М., Ларионов И.А., Мищенко М.А., Щербина А.О., Солодчук А.А. **2012**. Отклик геоакустической эмиссии на активизацию деформационных процессов при подготовке землетрясений. *Тихоокеанская геология*, 31(6): 59–67. EDN: PVYCVV
9. Патент RU 2758582 С1. *Способ обнаружения комплексного предвестника землетрясений*. Авт.: Сенкевич Ю.И., Марапулец Ю.В., Луковенкова О.О., Солодчук А.А., Мищенко М.А., Малкин Е.И., Гапеев М.И. № 2020138668; заявл. 26.11.2020; опубл. 29.10.2021, Бюл. № 31.
10. Сенкевич Ю.И., Мищенко М.А. **2023**. Методика оценки состояния приповерхностных осадочных пород по результатам наблюдений динамических характеристик геоакустической эмиссии. *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 45(4): 109–121. doi:10.26117/2079-6641-2023-45-4-109-121; EDN: UMHNFL
11. Сенкевич Ю.И., Марапулец Ю.В., Луковенкова О.О., Солодчук А.А. **2019**. Методика выделения информативных признаков в сигналах геоакустической эмиссии. *Информатика и автоматизация (Труды СПИИРАН)*, 18(5): 1066–1092. doi:10.15622/sp.2019.18.5.1066-1092
12. Сенкевич Ю.И. **2024**. Обработка и подготовка данных наблюдений в интересах выделения особенностей динамики характеристик геоакустической эмиссии. *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 47(2):

75–94. doi:10.26117/2079-6641-2024-47-2-75-94; EDN: ETBXVH

13. *Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов (1962 г. – наст. вр.)*. Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН. URL: <http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php> (дата обращения: 05.02.25).

References

1. Spivak A.A., Rybnov Y.S. **2021**. Acoustic effects of strong earthquakes. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 57(1): 37–45. doi:10.1134/S1069351321010092; EDN: DIDENF
2. Sychev V.N., Bogomolov L.M. **2013**. Potential of non-linear dynamics methods for analysis of geophysical series and seismicity. In: *VI International conference: Solar-terrestrial relations and physics of earthquakes precursors, Paratunka, Russia, September 9–13*, p. 179. URL: <https://www.ikir.ru/export/sites/ikir/ru/Events/Conferences/2013-VI-international/thesis-19.08.2013.pdf> (accessed 01.08.2025).
3. Saltykov V.A., Kugaenko Y.A. **2012**. Development of near-surface dilatancy zones as a possible cause for seismic emission anomalies before strong earthquakes. *Russian Journal of Pacific Geology*, 6(1): 86–95. doi:10.1134/S1819714012010113; EDN: PDKQFF
4. Segall P. **2010**. *Earthquake and volcano deformation*. Princeton, NJ, Princeton Univ. Press, xxiii+432 p.
5. Chebotareva I.Y., Volodin I.A., Dryagin V.V. **2017**. Acoustic effects in the deformation of structurally inhomogeneous media. *Acoustical Physics*, 63(1): 86–94. doi:10.1134/S106377101606004X; EDN: YVHORL
6. Sobolev G.A., Ponomarev A.V. **2003**. [*Earthquake physics and precursors*]. Moscow: Nauka, 270 p. (In Russ). EDN: RVEBFL
7. Muratov P.V., Rulenko O.P., Marapulets Y.V., Solodchuk A.A. **2018**. Electrical and acoustic response of the near-surface sedimentary rocks to seismic earthquake waves passing. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*, 25(5): 62–73. (In Russ.). doi:10.18454/2079-6641-2018-25-5-62-73; EDN: YSQAGL
8. Marapulets Y.V., Shevtsov B.M., Larionov I.A., Mishchenko M.A., Shcherbina A.O., Solodchuk A.A. **2012**. Geoacoustic emission response to deformation processes activation during earthquake preparation. *Russian Journal of Pacific Geology*, 6(6): 457–464. doi:10.1134/S1819714012060048; EDN: RGJBBZ
9. Patent RU 2758582 C1. [*A method for detecting a complex earthquake precursor*]. **2021**. Authors: Senkevich Yu.I., Marapulets Y.V., Lukovenkova O.O., Solodchuk A.A., Mishchenko M.A., Malkin E.I., Gapeev M.I. No. 2020138668; appl. 26.11.2020; publ. 29.10.2021, Bull. 31. (In Russ.).
10. Senkevich Yu.I., Mishchenko M.A. **2023**. Method for estimation of near-surface sedimentary rock state based on the results of observations of geoacoustic emission dynamic characteristics. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*, 45(4): 109–121. doi:10.26117/2079-6641-2023-45-4-109-121; EDN: UMHNFL
11. Senkevich Yu., Marapulets Yu., Lukovenkova O., Solodchuk A. **2019**. Technique of informative features selection in geoacoustic emission signals. *Informatics and Automation (SPIIRAS Proceedings)*, 18(5): 1066–1092. (In Russ). doi:10.15622/sp.2019.18.5.1066-1092
12. Senkevich Yu.I. **2024**. Processing and preparation of observation data in the interests of highlighting the features of the dynamics of the characteristics of geoacoustic emission. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*, 47(2): 75–94. doi:10.26117/2079-6641-2024-47-2-75-94; EDN: ETBXVH
13. *Catalog of earthquakes in Kamchatka and the Commander Islands*. Kamchatka Branch of FRC GS RAS. URL: <http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php> (accessed 05.02.25).

Об авторах

Сотрудники Института космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук, Паратунка Камчатского края, Россия:

Сенкевич Юрий Игоревич (<https://orcid.org/0000-0003-0875-6112>), доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории акустических исследований, senkevich@ikir.ru

Мищенко Михаил Александрович (<https://orcid.org/0000-0003-1958-5830>), кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории акустических исследований, micle@ikir.ru

About the Authors

Employees of the Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Paratunka, Kamchatka Krai, Russia:

Senkevich, Yury I. (<https://orcid.org/0000-0003-0875-6112>), Doctor in Engineering, Leading Researcher, Laboratory of acoustic research, senkevich@ikir.ru

Mishchenko, Mikhail A. (<https://orcid.org/0000-0003-1958-5830>), Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, Laboratory of acoustic research, micle@ikir.ru

Поступила 01.09.2025

Принята к публикации 27.10.2025

Received 1 September 2025

Accepted 27 October 2025