

Ю.И. СЕНКЕВИЧ, М.А. МИЩЕНКО
**МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ ПРИЗНАКОВ СВЯЗИ СИГНАЛА
ГЕОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ С СИЛЬНЫМИ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ НА КАМЧАТКЕ**

Сенкевич Ю.И., Мищенко М.А. Метод выделения признаков связи сигнала геоакустической эмиссии с сильными землетрясениями на Камчатке.

Аннотация. Известна опасность катастрофических последствий сильных землетрясений. Сейсмические процессы, связанные с подготовкой землетрясений в зоне субдукции, вызывают деформацию поверхностных слоев земной коры, включая осадочный слой, в котором наблюдается явление генерации акустических колебаний, известное как геоакустическая эмиссия (ГАЭ). Основной механизм генерации ГАЭ связан с движением дислокаций при взаимодействии фракций и их скоплениях в осадочных породах. Деформации в осадочном слое приводят к изменению его физических свойств и, как следствие, к изменению условий генерации акустических колебаний. Установлена связь между степенью напряженно-деформированного состояния осадочных пород и интенсивностью импульсного потока ГАЭ. Сигнал ГАЭ представляет собой поток импульсов, следующих с различной скважностью, амплитудой и формой. В периоды повышенной сейсмической активности в осадочных породах наблюдаются изменения параметров сигнала. Детальное изучение изменений характеристик фрагментов сигнала, фиксируемых в периоды, непосредственно связанные с началом землетрясений на Камчатке, и поиск их отличий от изменений фрагментов сигнала в периоды, не связанные с землетрясениями, составили суть проводимого исследования. В Институте космических исследований и распространения радиоволн (ИКИР ДВО РАН) ведется изучение изменчивости характеристик сигналов ГАЭ в периоды, предшествующие землетрясениям, в интересах разработки методов предсказания повышенной вероятности их возникновения на Камчатке. Приведены факты связи отклонений характеристик сигнала с сильными землетрясениями на Камчатке. Отличительной особенностью исследования является представление динамики характеристик сигнала в виде изображений для разномасштабных периодов наблюдений. Результатом исследования явился разработанный метод выделения признаков связи сигнала геоакустической эмиссии с сильными землетрясениями на Камчатке. Критерием степени связи определено значение сходства изображений динамики характеристик сигнала, связанных с моментами начала землетрясений.

Ключевые слова: приповерхностные осадочные породы, поверхностные волны, геоакустическая эмиссия, аномалии характеристик сигнала, сравнение изображений.

1. Введение. Сильные землетрясения наносят огромный социально-экономический ущерб на всех материках нашей планеты. Поэтому одной из важнейших задач современной геофизики остается поиск методов предсказания сильных землетрясений [1]. Сложность решения задачи поиска связана с необходимостью получения знаний об особенностях изменения физико-механических свойств земной коры и мантии перед землетрясением в каждом конкретном регионе. Деформационные процессы, инициируемые тектоническими

движениями, поддерживают неустойчивое напряженно-деформированное состояние среды в приповерхностных слоях литосферы [2, 3]. Такое состояние среды способно вызывать мгновенную реакцию осадочных пород даже на слабое воздействие поверхностных волн, порождаемых сейсмическими процессами. Реакция проявляется как заметное изменение характеристик акустических шумов, возникающих в породах. Такие шумы известны как геоакустическая эмиссия (ГАЭ) [2 – 4]. С помощью пьезоэлектрических датчиков акустические волны преобразуются в сигнал, который представляет непрерывный поток коротких электрических импульсов различной формы, амплитуды и скважности. Статистические характеристики этих параметров сигнала меняются в зависимости от текущего состояния среды, в которой генерируется акустический сигнал. Контроль параметров получаемого сигнала ГАЭ позволяет осуществлять мониторинг изменений его характеристик и формировать на основании анализа результатов наблюдений маркеры предвестников землетрясений [5 – 7]. Известные представления о природе возникновения ГАЭ в осадочных породах описываются моделью упругих колебаний в среде как результата нелинейной перестройки элементов мелкозернистой структуры сыпучих грунтов, обусловленной деформационными процессами и явлением дилатансии [1 – 5, 8]. Возникающая в осадочных породах ГАЭ опосредованно отражает поведение воздействующих тектонических и сейсмических процессов. Это позволяет, изучая особенности изменений характеристик ГАЭ, опосредованно давать оценку протекания таких геофизических явлений [7, 9]. В определенных случаях наиболее яркие проявления изменений статистических характеристик сигнала ГАЭ удастся связать с конкретными сейсмическими событиями [3, 10, 11].

На практике при анализе изменчивости характеристик ГАЭ следует учитывать факт влияния на эти показатели климатических факторов – атмосферного давления, температуры грунта и его влажности [12].

В ходе многолетних наблюдений, проводимых в лаборатории акустических исследований Института космофизических явлений и распространения радиоволн (ИКИР) ДВО РАН на Камчатке, неоднократно удавалось наблюдать изменчивость характеристик сигнала геоакустической эмиссии в моменты, предшествующие возникновению сильных землетрясений в пределах временных интервалов от 15 суток до единиц часов [8, 11, 12]. Проведенные наблюдения положили начало поиску предвестников землетрясений

и проверке их статистической устойчивости на основе наблюдаемых изменений характеристик сигнала ГАЭ [8 – 14] на различных временных интервалах.

Основной причиной сильных землетрясений на Камчатке является субдукция – тектоническое взаимодействие литосферных плит, при котором происходит погружение океанической Тихоокеанской литосферной плиты под континентальную Охотоморскую плиту Евразии [15]. Нелинейный характер такого взаимодействия составляет серьезную проблему поиска устойчивых признаков подготовки землетрясений [16, 17]. Это явление отражается в изменениях характеристик сигнала ГАЭ и, как следствие, в результатах измерений принимаемого акустического сигнала [18, 19].

Рассматриваемые здесь особенности изменчивости характеристик сигнала ГАЭ далее будут называться аномалиями. Особенности изменчивости характеристик ГАЭ на разных временных масштабах в периоды подготовки землетрясений – это отражение воздействия обширного комплекса нелинейных физических явлений, обусловленных критическими геодеформациями, возникающими по мере приближения напряжений в горных породах к предельным значениям. В результате нелинейного характера взаимодействия явлений аномалии ГАЭ достаточно трудно выделяются из-за большого разнообразия форм их проявления.

Возникает статистическая неустойчивость оценок параметров сигнала ГАЭ на непродолжительных временных интервалах, с одной стороны, и маскирование возможных динамических закономерностей статистических распределений параметров на продолжительных временных интервалах в силу наложений нескольких воздействующих факторов, с другой стороны. В частности, помимо названных причин сложного обнаружения аномалий, присутствует искажение сигнала наложением проявлений климатических и погодных факторов на процесс генерации ГАЭ.

Для детального изучения аномалий ГАЭ в лаборатории акустических исследований ИКИР ДВО РАН был разработан подход к представлению серии последовательных оценок выбранной характеристики сигнала на определенном временном интервале в виде изображения, подготовленного к дальнейшей обработке и анализу с использованием нейронных сетей [20]. В основу подхода заложена гипотеза о возможности сохранения детальной информации о влиянии поверхностных волн на процессы деформации приповерхностных пород. Это влияние отражается в непродолжительных эпизодах изменчивости динамики переходов состояний напряжений осадочного

слоя и, как следствие, на параметрах импульсного потока ГАЭ. Гипотеза базируется на результатах анализа многолетних наблюдений, в ходе которых проводился поиск скрытых закономерностей изменчивости характеристик ГАЭ на различных временных масштабах продолжительностью от нескольких часов до нескольких суток [19, 21]. Рассматриваются не статистические характеристики сигнала или его спектральные преобразования, а конструкция в виде совокупности собранных в матрицу результатов, отображающих изменчивость серии последовательных во времени распределений выбранной характеристики сигнала [22].

Определим целесообразность применения разработанного подхода с позиции отражения влияния изменений напряженных состояний осадочного слоя литосферы под действием деформационных процессов в статистической модели сигнала ГАЭ.

2. Моделирование сигнала геоакустической эмиссии.

На рисунке 1 приведены пятнадцатиминутные фрагменты записи сигнала ГАЭ, каждый из которых представляет собой последовательность акустических импульсов.

По каждому импульсу проводится измерение его параметров (амплитуда, длительность, межимпульсный интервал). На каждом фрагменте можно выделить более тысячи отдельных импульсов (например, 2262 и 3454 импульсов на рисунке 1(а) и 1(б) соответственно).

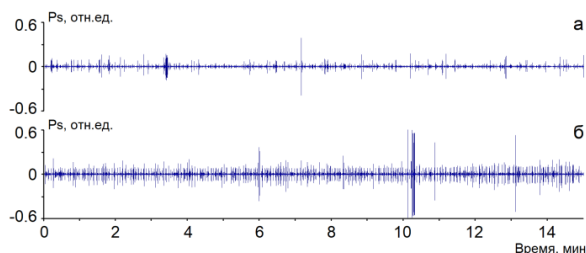


Рис. 1. Фрагменты записи сигнала акустической эмиссии, зарегистрированного в 2025 г.: а) 10 января; б) 25 сентября

Это позволяет получать параметрические оценки с достаточной статистической достоверностью, содержащей необходимую информацию о параметре распределения на каждом таком фрагменте сигнала. Например, за сутки можно получить 96 подобных оценок и проследить изменчивость выбранной характеристики на суточном периоде наблюдения. Для анализа изменчивости характеристик ГАЭ

на суточном периоде наблюдения в ходе проводимого исследования применялся метод сравнения статистических оценок распределений выбранного параметра.

Сигнал ГАЭ на выбранном периоде наблюдения рассматривается как последовательность независимых фрагментов потока акустических импульсов с изменяющимися во времени статистическими характеристиками. Вариации характеристик сигнала обусловлены влиянием изменений свойств среды, в которой генерируется сигнал ГАЭ, регистрируемый датчиками приемной аппаратуры. Под действием тектонических процессов и распространяющихся поверхностных волн изменяется текущее напряжение в приповерхностных слоях и происходит их деформирование [5, 6].

Необходимо сделать важное замечание по поводу искажения характеристик регистрируемых гидрофоном упругих акустических волн геоакустической эмиссии, которые, проходя через преобразующие и фильтрующие нелинейные цепи на выходе регистрирующей аппаратуры, трансформируются в радиоимпульс [23]. В процессе такой трансформации менее всего подвержены искажениям такие характеристики сигнала ГАЭ, как амплитуда, длительность импульса и межимпульсный интервал. Форма же импульса в сигнале существенно зависит от методов фильтрации преобразованного сигнала и частотных характеристик канала усиления приемной аппаратуры [24, 25]. Модуляция радиоимпульсов сигнала ГАЭ является продуктом резонансных свойств акустического приёмника и передаточных характеристик входных цепей регистрирующей аппаратуры [26]. Поэтому для поиска закономерностей изменчивости характеристик сигнала ГАЭ под действием деформации и напряженного состояния грунта предпочтительно проводить анализ характеристик амплитуды (максимальных значений), межимпульсных интервалов и длительности импульсов, а формфактор (огibaющую импульса) и его частотную модуляцию не учитывать для расчетов.

Для лучшего понимания влияния сейсмических воздействий на характеристики ГАЭ опишем условия приема сигнала ГАЭ в пункте комплексных геофизических наблюдений «Карымшина» на основании обзора и обобщения результатов ранее проведенных исследований [16 – 22]. Наблюдаемые на практике сигналы ГАЭ представляют поток релаксационных импульсов. Считая среду распространения упругих акустических волн ГАЭ в радиусе приема однородной и изотропной, в отсутствие внешних воздействий плотность распределения источников импульсов в среде можно

считать равномерной, а активацию источников равновероятной. Тогда сигнал будет представлять собой сумму импульсов, принятых от всех рассеянных по объему активированных точечных источников n за время наблюдения сигнала. В ранее проведенном исследовании [13] было показано, как получить число активированных точечных источников n в объеме полусферы с радиусом уверенного приема сигнала R за время наблюдения сигнала Δt . Схема приема импульсов ГАЭ с заглубленного приемника сигнала показана на рисунке 2.

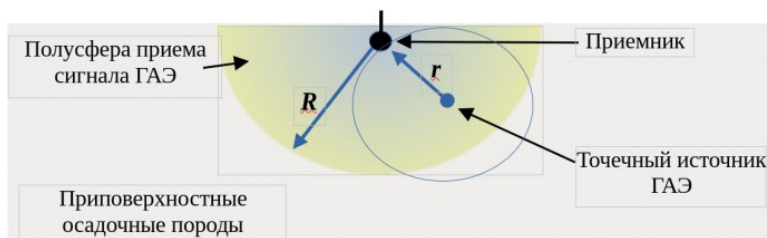


Рис. 2. Схема приема импульсов геоакустической эмиссии в пункте комплексных геофизических наблюдений «Карымшина»

Максимальное число таких источников $n_{\max}$ в объеме полусферы приема, определяющих импульсный поток (1) с учетом равномерной плотности распределения потенциальных источников импульсов ρ , равно (1):

$$n_{\max} = \frac{V}{2} \cdot \rho = \frac{2}{3} \pi R^3 \cdot \rho, \quad (1)$$

где: V – обобщенный коэффициент, зависящий от радиуса приема рассеянных по объему точечных источников акустической эмиссии.

В отсутствие воздействий на среду существует спонтанная или фоновая акустическая эмиссия. Необходимо учитывать снижение энергии импульсов, прямо связанное с затуханием амплитуды с расстоянием от источника до приемника r , линейной величины источников излучения в пористых, зерновых средах $\sim 10^{-4} - 10^{-2}$ м (рассматривается как точечный источник), и частотного диапазона принимающего пьезоэлектрического датчика – 0,1-10 кГц, скорости звука в осадочных породах с $\sim 1500 - 4500$ м/с. В пределах этих значений выполняется условие приема сигнала в зоне Френеля (ближняя зона приема сигнала). Влияние отражения от поверхности сред почва-воздух не учитывается. Тогда параметрическую модель сигнала акустической эмиссии можно представить в виде (2):

$$s(t) = \sum_{i=1}^{n_{max}} p_i \cdot g(A_i, \tau_i, T_i), \quad (2)$$

где: g – функция, описывающая импульс; τ_i – длительность i -го импульса, p_i – средняя вероятность активации i -го источника импульса; A_i – амплитуда i -го источника импульсов; межимпульсный интервал $T_i = t - t_i$, где t_i – время генерации i -го импульса; n_{max} – максимальное число в потенциальных источников импульсов в радиусе чувствительности приемной аппаратуры (1).

Чтобы представить модель сигнала ГАЗ, объясняющую влияние воздействия деформационных процессов на изменение характеристик сигнала, необходимо понять, как основные параметры модели (2): амплитуда A , длительность сигнала τ и межимпульсный интервал T , реагируют на физическое напряжение в поверхностном осадочном слое. Для этого рассмотрим некоторые наиболее известные зависимости формирования сигнала в точке излучения точечного источника акустических колебаний под воздействием напряжений и деформации [27 – 29]. Для расчета числа активированных источников в сфере приема сигнала под действием приложенного напряжения можно ориентироваться на эмпирическую формулу (3):

$$n = \alpha (\sigma - \sigma_0) \cdot m, \quad (3)$$

где: n – кумулятивное (накопленное) число импульсов акустической эмиссии; σ – приложенное напряжение (деформационное сжатие); σ_0 – пороговое напряжение (начало интенсивной генерации акустической эмиссии, соответствует значению предварительного уплотнения); α, m – эмпирические параметры материала, зависящие от плотности, гранулометрии, минералогии, влажности. Параметр m находится в диапазоне 1.5-3.0.

При возрастании напряжений σ интенсивность потока импульсов увеличивается. Можно ввести зависимость периода следования импульсов акустической эмиссии от напряжённого состояния среды [30, 31] (4):

$$\lambda = \lambda_0 \exp(-\alpha \cdot \sigma), \quad (4)$$

где: λ_0 – начальная скорость возникновения импульсов (при отсутствии дополнительной нагрузки), α – чувствительность частоты импульсов к уровню напряжённости.

По данным испытаний сред под нагрузкой зависимость изменений межимпульсных интервалов описывается степенным законом [32, 33], близким к пуассоновскому (5):

$$N(> T) \propto \lambda T^{-\sigma}, \quad (5)$$

где: $N(*)$ – упорядоченное множество распределения межимпульсных интервалов; T – межимпульсный интервал; λ – интенсивность события (частота возникновения импульсов), зависящая от напряжения σ .

На рисунке 3. представлена демонстрация распределения межимпульсных интервалов, полученного для двух фрагментов сигнала ГАЭ, полученных в различные периоды сейсмической активности, закон распределения которых близок к степенному закону.

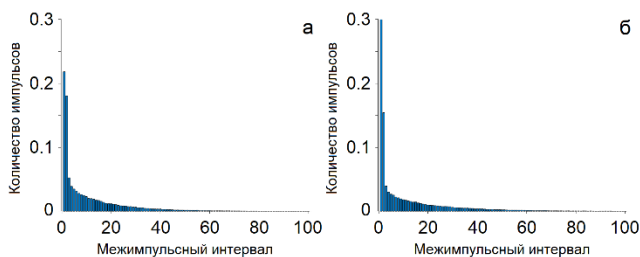


Рис. 3. Демонстрация степенного закона распределения межимпульсных интервалов для 96 15-минутных файлов ГАЭ, полученных в пункте комплексных геофизических наблюдений «Карымшина» в период:

- а) фоновой активности 02.11.2016 г.;
- б) предсейсмической активности 03.07.2018 г.

Функция плотности распределения вероятности межимпульсного интервала может быть представлена в следующем виде (6):

$$P(T \vee \sigma) = \lambda(\sigma) \exp(-\lambda(\sigma) \cdot T), \quad (6)$$

Рассмотрим следующую характеристику сигнала ГАЭ – амплитуду сигнала A и ее зависимость от значений напряжения σ в гравийно-песчаных грунтах. Для описания зависимости часто используют аппроксимацию обратного степенного закона (Закон Омури) [34, 35], описывающего изменение частоты

и амплитуды импульсов акустической эмиссии во времени после резкого изменения напряжения среды под действием деформации (7).

$$N(>A) \propto A^{-\alpha}, \quad (7)$$

где: $N(>A)$ – упорядоченное множество, распределение амплитуд (или энергией) не ниже A ; α – эмпирический коэффициент.

Формальное выражение распределения амплитуд импульсов акустической эмиссии в зависимости от деформации и напряжённого состояния в сыпучих грунтах часто описывается с помощью степенного закона [36, 37]. Для хрупких материалов (бетон, керамика, горные породы) справедливо следующая зависимость функции плотности вероятности распределения амплитуд (8).

$$P(A \vee \sigma) = \frac{b(\sigma)}{A_0} \left(\frac{A}{A_0} \right)^{-b(\sigma)}, \quad (8)$$

где: A – амплитуда сигнала акустической эмиссии; A_0 – минимальная амплитуда, определяемая чувствительностью приемной аппаратуры; параметр b (b -value) характеризует наклон амплитудного распределения и связан с уровнем девиаторного напряжения $q = \sigma_1 - \sigma_3$, где σ_1 – осевое напряжение, σ_3 – радиальное (боковое) напряжение).

На рисунке 4. представлена демонстрация степенного закона распределения амплитуд импульсов ГАЭ для двух фрагментов сигнала.

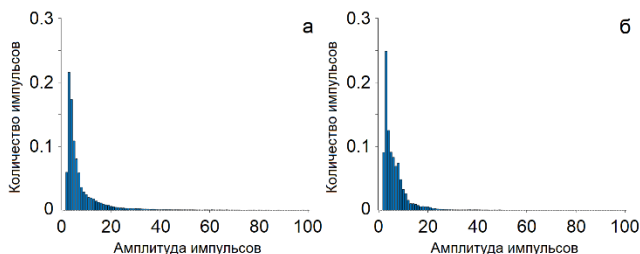


Рис. 4. Демонстрация степенного закона распределения амплитуд импульсов для 96 15-минутных файлов ГАЭ, полученных в пункте комплексных геофизических наблюдений «Карымшина» в период:

- а) фоновой активности 06.10.2016 г.;
- б) сейсмической активности 27.12.2016 г.

В научной литературе степенной закон распределения часто упоминается, как аппроксимация степенного закона распределения частот землетрясений в зависимости от их магнитуды – закон Гутенберга-Рихтера в геофизике [38, 39], который отражает скейлинговые свойства процесса генерации сигнала акустической эмиссии. Исследования [40, 41, 42] показывают значительное сходство статистических характеристик между сжатием пористого материала и напряженностью в различных средах под воздействием деформации, вызванной сейсмическими процессами, что подтверждает их масштабную инвариантность.

Проводимые в акустической лаборатории ИКИР ДВО РАН исследования подтвердили, что с ростом напряжения и интенсивности деформации амплитуда акустической эмиссии в поверхностном осадочном слое увеличивается. Это связано с активизацией микропроцессов в материале – ростом трещин, перестройкой структурных связей, фрикционным взаимодействием частиц [43, 44]. Перенос степенного закона на распределение амплитуд импульсов акустической эмиссии позволяет выразить вероятность акустической эмиссии в зависимости от напряжения среды с учетом изменения формы распределения в зависимости от условий воздействия.

Поэтому функцию распределения вероятности амплитуд часто представляют распределением Вейбулла [45] (9):

$$P(A \vee \sigma) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{A(\sigma)-A_0}{\beta}\right)^g\right), \quad (9)$$

где: A – амплитуда сигнала с учетом напряжения среды σ , A_0 – пороговое значение (нижняя граница принимаемых аппаратурой значений амплитуд), β – масштабирующий параметр (определяет диапазон амплитуд), g – параметр формы (характеризует симметричность и склонность распределения к большим или малым амплитудам; определяет форму распределения: $\beta < 1$ – убывающая экспоненциальная форма, $\beta \sim 1$ – асимметричная, $\beta > 1$ – приближающаяся к нормальному).

Далее рассмотрим известные зависимости распределения длительности импульсов акустической эмиссии от напряжения среды и воздействия разрушающей деформации.

Физика изменения длительности импульсов акустической эмиссии под действием напряжений и деформаций объясняется увеличением масштаба порождающего объекта (длина трещин, размер дислокационных ансамблей), а также возрастанием числа взаимодействующих источников [46]. Формально такая зависимость

выражается через изменение длины размера порождающего объекта следующим образом:

$$\tau \sim \frac{L}{c}, \quad (10)$$

где: L – размер порождающего объекта; c – скорость звука в материале.

При нагружении L растёт с напряжением σ по закону $L \sim \sigma^d$, где d зависит от механизма взаимодействия составляющих элементов среды, перераспределения контактных усилий между зёрнами в гранулированной среде. С учетом сказанного приведем формулу к виду (11):

$$\tau \sim \frac{\sigma^d}{c}. \quad (11)$$

Как и для амплитуд, распределение длительностей τ в популяции событий генерации импульсов акустической эмиссии подчиняется степенному закону [46, 37], что отражает масштабную инвариантность процесса возникновения импульсов акустической эмиссии при разрушениях сред. Кумулятивная зависимость распределения длительностей импульсов акустической эмиссии имеет вид упорядоченного множества (12):

$$N(>\tau) \propto C \cdot \tau^{-d}, \quad (12)$$

где: $N(>\tau)$ – количество последовательных событий с длительностью, превышающей τ ; C – нормировочная константа (продуктивность источника); d (d -value) – показатель степени, аналог b -значения для амплитуд. Параметры C и d являются функциями механического состояния: напряжения σ (или девиаторного напряжения $q = \sigma_1 - \sigma_3$, где σ_1 – осевое напряжение, σ_3 – радиальное напряжение).

На рисунке 5 представлена демонстрация степенного закона распределения длительностей импульсов ГАЭ

Функция распределения плотности вероятности длительности импульса τ акустической эмиссии описывается следующим уравнением [34, 25] (13):

$$P(\tau \vee \sigma) = \alpha \cdot \tau \cdot \exp\left(-\beta \frac{\tau}{\sigma}\right), \quad (13)$$

где β – масштабирующий параметр (определяет диапазон значений длительностей импульсов).

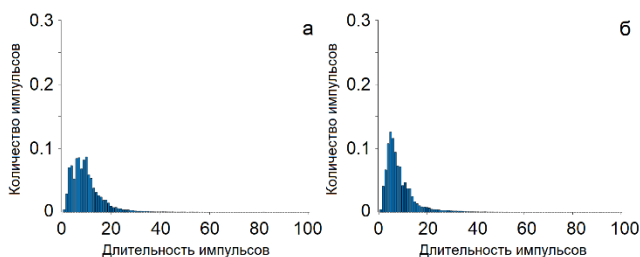


Рис. 5. Демонстрация степенного закона распределения длительностей импульсов для 96 15-минутных файлов ГАЭ, полученных в пункте комплексных геофизических наблюдений «Карымшина» в период:

- а) фоновой активности 13.10.2016 г.;
б) предсейсмической активности 12.09.2018 г.

Приведенные связи (5,7,12) дают возможность переписать модель (2) в виде совокупности зависимых параметров сигнала ГАЭ от величины напряжения поверхностных осадочных пород в полусфере приема (14):

$$s(t) = \sum_{i=1}^{n_{max}} p_i \cdot g(A_i(\sigma), \tau_i(\sigma), T_i(\sigma)), \quad (14)$$

где: p_i – средняя вероятность активации i -го источника импульса; g – функция, описывающая импульс; N – число активированных импульсов, связанное с напряженностью среды.

Модель (14) построена на данных многих практических исследований, указывающих на совокупное влияние напряжения в гранулированных средах на амплитуду, длительность и межимпульсный интервал, определяющие импульсный поток сигнала ГАЭ. Этот результат представления сигнала акустической эмиссии позволяет продемонстрировать физическую связь зависимости параметров сигнала с напряжением среды. Обнаруженное сходство процессов генерации сигнала геоакустической эмиссии в различных материалах при сжатии в лабораторных условиях и генерации сигнала, получаемого в ходе активных сейсмических проявлений [40], согласуются с результатами наблюдений, полученными в нашей лаборатории [47, 48]. Поэтому на базе модели (14) можно строить предположение о текущем состоянии среды, то есть решать обратную задачу.

Однако её решение на основе этой модели ограничивается тем, что оно будет описывать текущее состояние среды в конкретный момент времени и не дает возможности получить информацию о возможных закономерных изменениях, которым подвергалась среда на протяжении длительных наблюдений в предсейсмический период активности. Это существенно ограничивает информативные свойства получаемых данных мониторинга состояния среды и, как следствие, снижает возможности выделения аномалий сигнала, связанных с сильными землетрясениями.

2.1. Обоснование подхода к анализу сигнала ГАЭ. Измерения в Лаборатории акустических исследований ИКИР ДВО РАН, связанные с мониторингом сигналов акустической эмиссии в приповерхностном слое осадочных пород в пункте комплексного геофизического наблюдения «Карымшина» выполняются, начиная 1998 года по настоящее время. Мониторинг показал, что в периоды предсейсмической активности наблюдается заметная активация источников сигнала ГАЭ, которая проявляется на разных временных масштабах от нескольких недель до нескольких часов [49].

Ограничения классического статистического анализа распределений параметров о репрезентативности выборки и робастности предъявляют к выполнению обработки данных необходимое условие большого объема выборки данных, или применительно к сигналу – достаточно длительного времени наблюдения. В наших исследованиях это приводило к маскированию изменений состояния среды, которые происходили за короткие временные интервалы внешних воздействий на нее. Это также приводило к ограничению возможности детального анализа коротких воздействий, которые переносят полезную информацию. В то же время стремление проводить анализ на коротких интервалах времени приводило к потере корректности обобщенной информации. Кроме того, решение задачи анализа на многочисленных коротких интервалах времени приводило к значительным временным потерям и затратам приборных ресурсов.

Чтобы избежать потери информации, предлагается оригинальный подход к подготовке данных, который сможет обойти указанную проблему анализа. Данный подход опирается на представленную модель сигнала ГАЭ (14), которая позволяет рассматривать формирование сигнала, как совокупность отдельных независимых процессов влияния напряжения среды на его параметры. Причем дает возможность наблюдать динамику изменений характеристики каждого из параметров во времени посредством

сопоставления оценок параметра, полученных в последовательные короткие временные интервалы. Основой такого подхода служит разбиение длительного интервала наблюдения сигнала ГАЭ на последовательности равных по длительности коротких интервалов, содержащие достаточное количество импульсов для получения значимой оценки, и анализа полученных оценок для каждого из параметров независимо.

Пусть известно распределение каждого из параметров сигнала на длительном интервале θ : для межимпульсных интервалов $N(> T)$, для амплитуды $N(> A)$, для длительности импульса $N(> \tau)$. Представим это разбиение отдельно для каждого из параметров виде суммы выделенных распределений на равных достаточно коротких интервалах длительностью θ/m (15), зависящих от напряжения среды σ , которое на каждом отдельном таком интервале можно считать неизменным.

$$\begin{aligned} N(T \vee \sigma) &= \sum_{i=1}^m N_i(T \vee \sigma_i), \\ N(A \vee \sigma) &= \sum_{i=1}^m N_i(A \vee \sigma_i), \\ N(\tau \vee \sigma) &= \sum_{i=1}^m N_i(\tau \vee \sigma_i). \end{aligned} \quad (15)$$

Здесь m – число разбиений на короткие равные временные интервалы. Каждое отдельное распределение под знаком суммы в (15) представляет собой упорядоченное множество частоты попадания рассматриваемого параметра в интервалы от 1 до n , охватывающие установленный диапазон значений параметра, и может рассматриваться как вектор значений параметра. Последовательность таких векторов можно представить в виде двумерной матрицы вида (16):

$$D_{\theta} = \begin{bmatrix} a_{1,n} & a_{2,n} & \dots & a_{m-1,n} & a_{m,n} \\ a_{1,n-1} & a_{2,n-1} & \dots & a_{m-1,n-1} & a_{m,n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ a_{1,2} & a_{2,2} & \dots & a_{m-1,2} & a_{m,2} \\ a_{1,1} & a_{2,1} & \dots & a_{m-1,1} & a_{m,1} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

где: $a_{i,j}$ – значение выбранного параметра сигнала; $i = [1, m]$ – порядковый номер вектора распределения; $j = [1, n]$ – порядковый номер интервала распределения.

Матрица D_{θ} содержит последовательность векторов распределений выбранного параметра ГАЭ на интервале наблюдения θ , тем самым сохраняя информацию о коротких временных фрагментах сигнала, отражающих информацию о деталях изменений напряжений среды при прохождении через нее поверхностных волн, с одной

стороны. При этом в совокупности своих элементов матрица (16) при достаточно больших интервалах наблюдений D_y может содержать информацию о медленных деформационных процессах, порождаемых длительными тектоническими воздействиями, с другой стороны.

В целом матрица $D\theta$ является характеристикой, отражающей динамику изменений напряжений в приповерхностном слое в радиусе приема сигнала ГАЭ за время установленного наблюдения θ , с разрешением по времени – θ/m , и разрешением по значению выбранного параметра – $3 \cdot \sigma/n$, где σ – дисперсия выбираемого параметра. Матрицу (16) в дальнейшем удобно рассматривать как изображение, передающее информативный паттерн динамики распределений выбранного параметра сигнала ГАЭ.

3. Препроцессинг сигналов геоакустической эмиссии. Важный вопрос о выборе временного интервала для обнаружения аномалий характеристик сигнала ГАЭ, основывается на физике происхождения форшоков и афтершоков [50]. Современные исследования, использующие результаты анализа сигналов ГАЭ подтверждают, что с приближением к моменту начала землетрясений активность проявления форшоков, сопровождаемых генерацией АЭ экспоненциально возрастает (Закон Гутенберга-Рихтера), а после катастрофического явления проявление афтершоковой активности экспоненциально снижается (Закон Омори), образуя специфический график общей сейсмической активности [51]. Отсюда следует, что поиск специфических аномалий на краткосрочном периоде наблюдений ГАЭ (от нескольких часов до примерно двадцати суток) с большей вероятностью следует искать вблизи участков форшоковой и афтершоковой активности, связанной с сильными землетрясениями.

Все ниже описываемые эксперименты выполнялись ретроспективно на базе данных сигналов ГАЭ лаборатории акустических исследований, полученных в пункте комплексных геофизических наблюдений «Карымшина» ИКИР ДВО РАН [52]. По результатам бурения приповерхностные породы в данном пункте наблюдения являются осадочными с толщиной слоя более 20 м [56]. Это подтверждается тем, что в 170 м от гидрофона находится буровая скважина № 99-8 Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН глубиной 19 м. Ее геологическая колонка представлена слоистыми отложениями с песчано-глинистым заполнением (0-5 м), глыбово-щебнистыми отложениями с глинистым заполнителем (5-14 м) и валунно-галечными отложениями с песчаным заполнителем (14-19 м). Таким образом, основная часть источников принимаемых сигналов ГАЭ описывается свойствами фракций геологической колонки,

представляющих приповерхностные осадочные породы сложной слоистой структуры без присутствия твердых монолитных гранитных пород. Это исключает формирование ГАЭ в результате растрескивания пород вследствие деформации, а основным источником ГАЭ в этих слоях будут дилатансия и контракция [53, 54] под действием деформации, вызванной сейсмическими волнами и продолжительным тектоническим напряжением.

Начиная с 2015 года до настоящего времени в пунктах комплексных геофизических наблюдений «Карымшина» и «Мижижа» ведутся непрерывные удаленные наблюдения аномалий сигналов ГАЭ и связанных с ними деформаций, на основе которых формируется специализированная база данных [55, 56]. Из базы данных выбирались участки записей сигналов ГАЭ, которые охватывали разномасштабные по времени фрагменты длительностью от нескольких часов до двадцати суток и, в зависимости от поставленной задачи, либо примыкали непосредственно к моментам начала выбранных из каталога землетрясений и взятые непосредственно после них, либо составляли последовательности, полученные скользящим временным окном в районе от 1 до 20 суток. Для экспериментов в рамках проводимого исследования были отобраны землетрясения, произошедшие в период с сентября 2016 г. по декабрь 2019 г., с энергетическим классом K_S не менее 10.0. В региональном сейсмическом каталоге [57] зарегистрировано 981 такое событие. Из них были отобраны землетрясения, для которых выполнялось следующее условие (17):

$$d/R_D < 1, R_D = 10^{0,43(K_S-4,6)/1,5}, \quad (17)$$

где R_D – радиус зоны Добровольского, d – расстояние от пункта наблюдений до эпицентра землетрясения, K_S – энергетический класс. Условие (17) ограничивает выбор сильных камчатских землетрясений, эпицентры которых находятся в радиусе чувствительности датчиков приемной аппаратуры.

Известно, что принципиально важное значение для качественного анализа приобретает препроцессинг данных, который с появлением нейросетевой обработки данных превратился в огромную индустрию разработки алгоритмов искусственного интеллекта. До последнего десятилетия трудно было представить классификацию более тысячи фрагментов сигналов в практике проведения непрерывных наблюдений в реальном времени. Сравнительный анализ графического представления нечетких картин распределений параметров, какими являются характеристики ГАЭ, визуально практически неразличим

при сравнении даже небольшого числа коротких фрагментов сигнала. Это значительно снижает качество поиска различий при инструментальном сравнении результатов обработки сигналов и их идентификации. Для выхода из создавшейся ситуации была предпринята попытка анализа трехмерных графических изображений, построенных на матрицах вида (18) (Рис. 6).

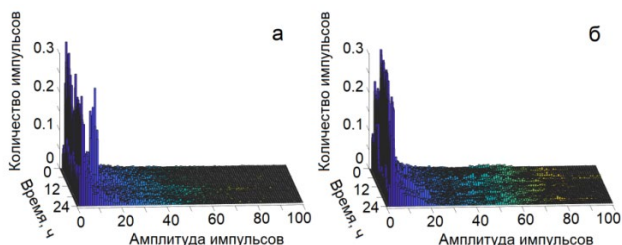


Рис. 6. Пример формирования массива данных динамики распределения амплитуд импульсов сигнала ГАЭ за сутки в 2025 г.: а) 10 января; б) 25 сентября

На рисунке 6 приведены последовательно записанные пятнадцатиминутные фрагменты сигнала ГАЭ в виде поочередно выстроенных нормированных гистограмм распределения амплитуд импульсов. При таком представлении картина изменчивости характеристики сигнала на суточном интервале обработки сигнала ГАЭ более наглядна. Такое графическое представление наилучшим образом отражает динамику амплитудного распределения на интервале обработки. Однако как визуальный, так и инструментальный анализ еще более усложнился. Решение возникшей проблемы с анализом трехмерных изображений было найдено в ходе изучения высококачественной обработки и классификации изображений современными программно-ориентированными архитектурами нейронных сетей [58, 59, 60]. Такие нейронные сети широко используются в различных научных областях для идентификации, кластеризации и классификации изображений.

Поэтому для дальнейших исследований использовались массивы данных динамики распределений параметров импульсов сигнала ГАЭ в виде нормированных и приведенных к цветовой шкале матричных представлений (18).

На рисунке 7(а, б) представлена пара таких изображений, полученных на основе данных, представленных на рисунке 6.

Более детально формирование матриц для изображений и их использование для идентификации аномалий ГЭЭ перед сильными землетрясениями представлено в описании патента [14, 20].

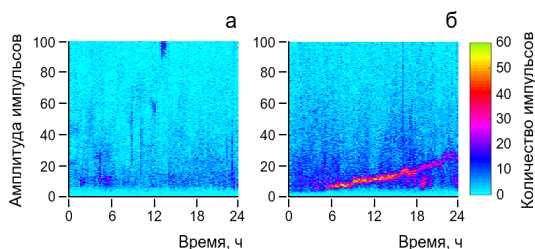


Рис. 7. Графическое представление массивов данных динамики распределения амплитуды импульсов сигнала ГЭЭ (Рис. 3(а, б)), подготовленное для обработки нейронной сетью

4. Обнаружение связи сигнала геоакустической эмиссии с сильными землетрясениями. Задача выявления связи сигнала геоакустической эмиссии с сильными землетрясениями может быть сведена к задаче определения степени сходства паттернов изображений, полученных из фрагментов сигнала ГЭЭ, нарезанных на этапе краткосрочного периода до начала землетрясения $\{D_{(q)}\}$ (период от нескольких часов до двух недель) – отнесенных к связанным с землетрясением изображениям, когда, как было показано в начале статьи, сейсмическая деятельность наиболее ярко отражается на параметрических распределениях сигнала.

Изображения, полученные из фрагментов сигнала ГЭЭ на достаточно значительном временном удалении от момента землетрясения $\{D_{(f)}\}$ принимаются как фоновые изображения. По результатам нарезки фрагментов сигнала ГЭЭ получаем две группы изображений C_q и C_f , соответственно с которыми выполняется следующая последовательность действий. Выполняется объединение множеств $\{D\} = \{D_{(q)}\} \cup \{D_{(f)}\} = \{D_1, D_2, \dots, D_N\}$, где каждое изображение D_i – двумерная матрица размером $h \times w$ ($h, w \in \mathbb{N}$) с элементами из некоторого множества значений $\mathbb{Z}$ дискретных цветовых каналов. Вытягиванием матрицы по столбцам (отдельным распределениям выбранного параметра) для каждого элемента D_i получаем векторы $\vec{D}_i \in \mathbb{Z}^{hw}$. Среди векторов проводится кластеризация с использованием евклидова расстояния в качестве метрики сравнения векторов (18):

$$d(D_i, D_j) = \|\vec{D}_i - \vec{D}_j\| = \sqrt{\sum_{r=1}^h \sum_{c=1}^w (D_i(r, c) - D_j(r, c))^2}. \quad (18)$$

Для заданного числа кластеров $K=2$ находится разбиение, минимизирующее сумму квадратов расстояний от элементов до центров кластеров (19):

$$\min_{C, \{\mu_k\}} \sum_{k=1}^K \sum_{D \in C_k} d^2(D, \mu_k), \quad (19)$$

где μ_k – центр кластера C_k .

Результат – разбиение множества $\{D\}$ на два кластера (группы) C'_q и C'_f , с новым набором изображений в группах $\{D'_{(q)}\}$ и $\{D'_{(f)}\}$, соответственно. Отношение числа совпадающих и несовпадающих изображений (элементов множеств) для каждой пары классов C'_q, C_q, C'_f, C_f позволяет рассчитать показатели качества кластеризации по отношению к изначально заданным группам (20):

$$\begin{aligned} Q_{true} &= \#(D_{(q)} \cap D'_{(q)}) / \#D_{(q)}, \\ Q_{false} &= \#(D_{(q)} \cap D'_{(f)}) / \#D_{(q)}, \\ F_{true} &= \#(D_{(f)} \cap D'_{(f)}) / \#D_{(f)}, \\ F_{false} &= \#(D_{(f)} \cap D'_{(q)}) / \#D_{(f)}. \end{aligned} \quad (20)$$

где показатели: Q_{true} – доля верно отнесенных изображений из кластера, отнесенного к связанным с землетрясениями изображениями $\{D'_{(q)}\}$ по отношению к условно отнесенной группе связанных с землетрясениями изображений $\{D_{(q)}\}$; Q_{false} – доля числа изображений из кластера фоновых $\{D'_{(f)}\}$, ошибочно отнесенных к группе условно связанной с землетрясениями группе изображений $\{D_{(q)}\}$; F_{true} – доля верно отнесенных изображений из кластера фоновых изображений $\{D'_{(f)}\}$ по отношению к числу исходных фоновых изображений $\{D_{(f)}\}$; F_{false} – доля ошибочно отнесенных к связанным с землетрясениями изображений из кластера $\{D'_{(q)}\}$ по отношению к числу исходных фоновых изображений $\{D_{(f)}\}$.

Перечисленные показатели в полной мере характеризуют информативность изображений по отношению к их связи с землетрясениями. Чем выше показатель Q_{true} , отражающий

специфичность связанных с землетрясением изображений, и чем ниже показатель Q_{false} , отражающий отличие от них паттернов фоновых изображений, тем более достоверно утверждение о глубине связи сейсмических событий с динамикой распределений параметров сигналов ГАЭ в период краткосрочных наблюдений перед землетрясениями.

5. Апробация метода. Для проверки разработанного метода обнаружения признаков связи сигнала ГАЭ с землетрясениями на этапе краткосрочного периода подготовки землетрясений был проведен эксперимент с использованием нейросетевых технологий подготовки и кластеризации изображений.

С помощью описанного выше препроцессинга сигналов ГАЭ было подготовлено 31 изображение, связанное с сильными землетрясениями на Камчатке в период с начала сентября 2016 года по конец декабря 2019 года, а также 96 изображений для фрагментов сигнала ГАЭ на удалении от моментов начала землетрясений не менее 20 суток.

Для обработки изображений применялась программа на языке Python с функциями весового выравнивания и кластеризации библиотеки scikit-learn. В таблице 1 представлены сводные результаты обработки и рассчитанные значения показателей искомой связи.

Таблица 1. Результаты обработки изображений

Классы	Число в группе	Число в кластере	Совпало	Показатель
Связанные с землетрясениями	31	36	13	13/31
				8/96
Фоновые	96	91	88	88/96
				8/31

Результаты вычисления показателя верно отнесенных объектов Q_{true} свидетельствуют о том, что в трети случаев наблюдается определенная связь фрагментов сигнала ГАЭ с землетрясениями, поскольку существует совпадение изображений из кластера, отнесенного к связанным с землетрясениями изображениями $\{D'_{(q)}\}$ с изображениями, полученными на суточных фрагментах сигнала ГАЭ накануне 20-суточного интервала перед сильными землетрясениями $\{D_{(q)}\}$. При этом показатель Q_{false} ошибочно отнесенных к группе, условно связанной с землетрясениями группе изображениям $\{D_{(q)}\}$ относительно мал.

Полученные показатели доль, верно отнесенных к фоновым изображениям – F_{true} и F_{false} – доли ошибочно отнесенных к связанным с землетрясениями изображений указывают на высокую степень сходства паттернов фоновых изображений.

6. Заключение. Обнаружение и классификация специфических отклонений характеристик геоакустической эмиссии, связанных с сильными землетрясениями на Камчатке – это многолетнее системное направление научных исследований лаборатории акустических исследований ИКИР ДВО РАН, которое в перспективе направлено на решение задач предсказания катастрофических событий, вызванных сейсмическими явлениями.

В ходе исследования был проведен анализ современных исследований по данным открытых источников, направленных на изучение связи напряжений приповерхностных слоев литосферы, возникающих под действием тектонических движений земной коры. В результате обобщения изложенных фактов, известных и подтвержденных закономерностей связи напряжений поверхностного слоя осадочных пород под действием сейсмических поверхностных волн, была предложена параметрическая модель связи таких явлений, выраженная через основные параметры геоакустической эмиссии. Модель позволяет объяснить опосредованное изменение амплитудных распределений, распределений межимпульсных интервалов и распределений длительностей импульсов ГАЭ от состояния напряженности среды в зоне приема акустического сигнала.

Был предложен и реализован подход представления фрагментов сигнала ГАЭ на разных временных интервалах в виде матриц, составленных из распределений каждого отдельного измеряемого параметра сигнала на заданных разномасштабных временных интервалах. Такая трансформация сигнала ГАЭ позволяет собрать информацию о динамике его последовательных распределений от одного выделенного короткого интервала к другому и представить полученную характеристику в виде матрицы, которая визуально наблюдается как трехмерное изображение.

Совокупность получаемых изображений, собранная в периоды, предшествующие многолетним камчатским землетрясениям, составляет базу данных изображений, ориентированных на использование эффективных алгоритмов искусственного интеллекта с применением нейронных сетей. Применение нейросетевых технологий для анализа данных позволило показать и наглядно оценить сравнимость паттернов

изображений, отражающих динамику характеристик сигнала ГЭЭ, путем применения кластеризации.

Разработанный метод позволил дать основание для утверждения о существовании признаков связи сигнала геоакустической эмиссии с сильными землетрясениями на Камчатке, а также существования признаков значительного сходства характеристик фоновых фрагментов сигнала. Дальнейшее накопление данных наблюдений ГЭЭ, вероятно, позволит составить более убедительную статистику для принятия решений о предупреждении опасности возникновения сильных землетрясений в краткосрочный период перед их началом.

Литература

1. Шебалин П.Н., Гвишиани А.Д., Дзедобоев Б.А., Скоркина А.А. Почему необходимы новые подходы к оценке сейсмической опасности? // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 507. №1. С. 91–97. DOI: 10.31857/S2686739722601466.
2. Спивак А.А., Рыбнов Ю.С. Акустические эффекты сильных землетрясений // Физика Земли. 2021. №1. С. 41–50. DOI: 10.31857/S0002333721010099.
3. Сычев В.Н., Богомолов Л.М. Потенциал методов нелинейной динамики для анализа геофизических рядов и сейсмичности // Сб. научн. ст. VI Международной конференции «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений». 2013. С. 78.
4. Богомолов Л.М., Сычева Н.А. Прогноз землетрясений в XXI веке: предыстория и концепции // Геосистемы переходных зон. 2022. Т. 6. №3. С. 145–182. DOI: 10.30730/gtr.2022.6.3.145-164.164-182.
5. Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А. Развитие приповерхностных зон дилатансии как возможная причина аномалий в параметрах сейсмической эмиссии перед сильными землетрясениями // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. №1. С. 96–106.
6. Чеботарева И.Я., Володин И.А., Дрягин В.В. Акустические эффекты при деформировании структурно неоднородных сред // Акустический журнал. 2017. Т. 63. №1. С. 84–93. DOI: 10.7868/S0320791916060046.
7. Пономарев А.В., Соболев Г.А. Физика землетрясений и предвестники // М.: Наука. 2003. 270 с.
8. Муратов П.В., Руленко О.П., Марапулец Ю.В., Солодчук А.А. Электрический и акустический отклик приповерхностных осадочных пород на прохождение сейсмических волн от землетрясений // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2018. №5(25). С. 62–73. DOI: 10.18454/2079-6641-2018-25-5-62-73.
9. Гаврилов В.А. Воздействие переменных электромагнитных полей на геоакустические процессы: эмпирические закономерности и физические механизмы: специальность 25.00.10 «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых»: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук / Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИВиС ДВО РАН). Петропавловск-Камчатский, 2017. 51 с.
10. Segall P. Earthquake and Volcano Deformation // Princeton: Princeton University Press. 2010. 464 p.
11. Марапулец Ю.В., Шевцов Б.М., Ларионов И.А., Мищенко М.А., Щербина А.О., Солодчук А.А. Отклик геоакустической эмиссии на активизацию

- деформационных процессов при подготовке землетрясений // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. №6. С. 59–67.
12. Богданов В.В., Бычков В.В., Водинчар Г.М. Динамика физических процессов в активных зонах ближнего космоса и геосфер: избранные работы 2018-2020 гг. / Под ред. Шевцов Б.М. // М.: РАН, 2021. 409 с.
 13. Сенкевич Ю.И., Мищенко М.А. Методика оценки состояния приповерхностных осадочных пород по результатам наблюдений динамических характеристик геоакустической эмиссии // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2023. Т. 45. №4. С. 109–121. DOI: 10.26117/2079-6641-2023-45-4-109-121.
 14. Сенкевич Ю.И., Марапулец Ю.В., Луковенкова О.О., Солодчук А.А. Методика выделения информативных признаков в сигналах геоакустической эмиссии // Труды СПИИРАН. 2019. Т. 18. №5. С. 1066–1092. DOI: 10.15622/sp.2019.18.5.1066-1092.
 15. Баранов Б.В., Цуканов Н.В., Гедике К., Фрейтаг Р., Дозорова К.А. Морфология и особенности строения зоны субдукции в районе сочленения Курило-Камчатской и Алеутской дуг // Океанология. 2022. Т. 62. №4. С. 528–539. DOI: 10.31857/S0030157422040025.
 16. Авдейко Г.П., Палуева А.А. Сегментация камчатской зоны субдукции и оценка сейсмической активности сегментов // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле. 2010. №15(1). С. 69–89.
 17. Сафонов Д.А. Пространственное распределение тектонических напряжений в южной глубокой части Курило-Камчатской зоны субдукции // Геосистемы переходных зон. 2019. Т. 3. №2. С. 175–188. DOI: 10.30730/2541-8912.2019.3.2.175-188.
 18. Гапеев М.И., Марапулец Ю.В. Моделирование зон относительных сдвиговых деформаций перед сильными землетрясениями на Камчатке, произошедшими в период 2018-2021 гг. // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2021. Т. 37. №4. С. 53–66. DOI: 10.26117/2079-6641-2021-37-4-53-66.
 19. Senkevich Y., Mishchenko M., Solodchuk A. Observation of the State of the Near-surface Lithosphere Layer based on the Analysis of the Dynamics of the Geoaoustic Emission Signal Characteristics // Proceedings of the IEEE 3rd International Conference on Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering (PIERE). 2024. pp. 1140–1143. DOI: 10.1109/PIERE62470.2024.10805026.
 20. Сенкевич Ю.И. Обработка и подготовка данных наблюдений в интересах выделения особенностей динамики характеристик геоакустической эмиссии // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2024. Т. 47. №2. С. 75–94. DOI: 10.26117/2079-6641-2024-47-2-75-94.
 21. Сенкевич Ю.И., Мищенко М.А., Солодчук А.А., Луковенкова О.О., Гапеев М.И. Стохастическое моделирование сигнала геоакустической эмиссии // Цифровая обработка сигналов. 2023. №1. С. 27–34.
 22. Патент RU 2758582 C1. Способ обнаружения комплексного предвестника землетрясений: №2020138668: заявл. 26.11.2020: опубл. 29.10.2021 / Сенкевич Ю.И., Марапулец Ю.В., Луковенкова О.О., Солодчук А.А., Мищенко М.А., Малкин Е.И., Гапеев М.И.
 23. Буйло С.И. Физико-механические, статистические и аспекты акустико-эмиссионной диагностики: монография // Таганрог: Изд-во Южного федерального университета, 2017. 182 с.
 24. Грешников В.А. Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий // М.: Изд-во стандартов, 1976. 272 с.
 25. Семашко Н.А., Шпорт В.И., Марьин Б.Н. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении // М.: Машиностроение, 2002. 239 с.
 26. Grosse C.U., Ohtsu M., Aggelis D.G., Shiotani T. Acoustic Emission Testing // Springer Tracts in Civil Engineering. Springer. 2022. 746 p. DOI: 10.1007/978-3-030-67936-1.

27. Березин Ю.А., Сподарева Л.А. Распространение акустических сигналов в грунтах // Прикладная механика и техническая физика. 2001. Т. 42. №4(248). С. 177–183.
28. Ou J., Wang E., Wang X., et al. Acoustic emission characteristics and damage evolution of different rocks under uniaxial compression conditions // Scientific Reports. 2024. vol. 14. pp. 1–10. DOI: 10.1038/s41598-024-54950-9.
29. Lockner D. The Role of Acoustic Emission in the Study of Rock Fracture // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1993. vol. 30. no. 7. pp. 883–899.
30. Xiangguo K., Enyuan W., Xueqiu H., et. al. Multifractal characteristics and acoustic emission of coal with joints under uniaxial loading // Fractals. 2017. vol. 25. no. 5. pp. 1–11. DOI: 10.1142/S0218348X17500451.
31. Carpinteri A., Lacidogna G., Puzzi Si. From criticality to final collapse: Evolution of the “b-value” from 1.5 to 1.0 // Chaos, Solitons & Fractals. 2009. vol. 41. pp. 843–853 DOI: 10.1016/j.chaos.2008.04.010.
32. Guarino A., Garcimartin A., Ciliberto S. An experimental test of the critical behaviour of fracture precursors // The European Physical Journal B – Condensed Matter and Complex Systems. 1998. vol. 6. pp. 13–24. DOI: 10.1007/s100510050521.
33. Морозова К.Г. Сейсмоакустическая эмиссия, сопровождающая различные режимы скольжения по разломам и трещинам: специальность 1.6.9 «Геофизика»: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук / Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук (ИДГ РАН). Москва, 2023. 144 с.
34. Шереметьева О.В., Шевцов Б.М. Аппроксимация законов распределения времён ожидания форшоков на основе дробной модели деформационной активности // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2022. Т. 40. №3. С. 137–152. DOI: 10.26117/2079-6641-2022-40-3-137-152.
35. Милешкин М.Б. Библик И.В., Стоев П.И. Анализ амплитудного распределения сигналов акустической эмиссии на основе расчетно-экспериментального метода // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7. №S1-1. С. 206–209.
36. Lacoste M., Ruiz S., Or D. Listening to earthworms burrowing and roots growing – acoustic signatures of soil biological activity // Scientific Reports. 2018. vol. 8. pp. 1–9. DOI: 10.1038/s41598-018-28582-9.
37. Кочарян Г.Г., Кочарян А.А. Акустическая эмиссия при различных режимах межблоковых перемещений // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2015. №1. С. 3–13.
38. Баранов С.В. Оценка активности афтершокового процесса с помощью закона Гутенберга – Рихтера и etas-модели // Фундаментальные исследования. 2014. №12. С. 751–755.
39. Baro J., Corral A., Illa X., et al. Statistical Similarity between the Compression of a Porous Material and Earthquakes // Physical Review Letters. 2013. vol. 110. 088702 p. DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.088702.
40. Sedghizadeh M., Van Den Berghe M., Shcherbakov R. Statistical and clustering analysis of microseismicity from a Saskatchewan potash mine // Frontiers in Applied Mathematics and Statistics. 2023. vol. 9. 1126952 p. DOI: 10.3389/fams.2023.1126952.
41. Турунтаев С.Б. Кинетика техногенной сейсмичности: специальность 25.00.10 «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых»: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук / Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН). Москва, 2005. 330 с.
42. Мищенко М.А., Марапулец Ю.В., Ларионов И.А. Анализ временных и частотных характеристик одновременных геодеоформационных сигналов в пункте

- наблюдений «Карымшина» // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2019. Т. 29. №4. С. 166–172. DOI: 10.26117/2079-6641-2019-29-4-166-172.
43. Marapulets Y., Solodchuk A., Shcherbina A. Changes of geoaoustic emission directivity at «Mikizha» site associated with earthquakes in Kamchatka // Proceedings of the VII International Conference Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquakes precursors. 2016. 5 p. DOI: 10.1051/e3sconf/20161100014.
44. Feller K.R., Abercrombie R.E., Ekstrom G. A Common Origin for Aftershocks, Foreshocks, and Multiplets // Bulletin of the Seismological Society of America. 2004. vol. 94. no. 1. pp. 88–98. DOI: 10.1785/0120030069.
45. Иванов В.И., Барат В.А. Акустико-эмиссионная диагностика (справочник) // М.: Спектр, 2017. 362 с.
46. Щербина А.О., Солодчук А.А. Локализация источников акустического излучения по данным распределенной системы комбинированных приемников // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2023. Т. 44. №3. С. 144–156. DOI: 10.26117/2079-6641-2023-44-3-144-156.
47. Senkevich Y., Mishchenko M., Solodchuk A. Observation of the State of the Near-surface Lithosphere Layer based on the Analysis of the Dynamics of the Geoaoustic Emission Signal Characteristics // Proceedings of the IEEE 3rd International Conference on Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering (PIERE). 2024. pp. 1140–1143. DOI: 10.1109/PIERE62470.2024.10805026.
48. Проект РНФ 18-11-00087. Комплексный анализ акустических и электромагнитных сигналов для оценки уровня сейсмической опасности и предупреждения природных и техногенных катастроф. 2021.
49. Татевосян Р. Э. Афтершок // Большая российская энциклопедия: научно-образовательный портал. URL: <https://bigenc.ru/c/aftershok-b80b0f?v=5911142> (дата обращения 25.01.2026)
50. Богомолов Л.М., Родкин М.В., Сычев В.Н. Инстантонное представление форшок-афтершоковых последовательностей // Физика Земли. 2025. №2. С. 43–57. DOI: 10.7868/S3034645225020045.
51. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2017620097 от 19.01.2017. База данных "Геодеформационные наблюдения в долине реки Карымшина (полуостров Камчатка)" / Ларионов И.А., Мищенко М.А.
52. Цирель С.В. Дилатансия в грунтах // Большая российская энциклопедия: научно-образовательный портал. URL: <https://bigenc.ru/c/dilatansia-v-gruntakh-792dde> (дата обращения: 25.01.2026)
53. Мирный А.Ю. Исследования дилатансии в дисперсных грунтах и методы ее количественной оценки // Инженерная геология. 2019. Т. 14. №2. С. 34–43. DOI: 10.25296/1993-5056-2019-14-2-34-43.
54. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2017621061 от 20.09.2017 г. База данных «Аномальные возмущения высокочастотной геоакустической эмиссии в пунктах наблюдений "Микижа" и "Карымшина" (полуостров Камчатка)» / Мищенко М.А., Ларионов И.А.
55. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2018621109 от 19.07.2018 г. База данных «Геоакустические и деформационные аномалии в долине реки Карымшина (полуостров Камчатка)» / Ларионов И.А., Мищенко М.А.
56. Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов // Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН. URL: <http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php> (дата обращения: 25.01.2026).
57. Мингалев А.В. Метод и алгоритмы обработки тепловизионных изображений на основе сверточных нейронных сетей для автоматического обнаружения заданных типов объектов // Вестник Рязанского Государственного Радиотехнического Университета. 2025. №91. С. 158–167. DOI: 10.21667/1995-4565-2025-91-158-167.

58. Увайсов С.У., Черновская В.В., Данг Н.В., Туан Н.В. Применение искусственной нейронной сети в задаче тепловой диагностики печатного узла устройства контроля разбега самолета // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2022. Т. 10. №3(38). С. 23–24. DOI: 10.26102/2310-6018/2022.38.3.012.
59. Набатов Н.Н., Ерачина С.М. Использование сверточных нейронных сетей для удаления шума и восстановления изображений в медицинской и телеметрической практике // Международный научно-исследовательский журнал. 2025. №10(160). С. 1–14. DOI: 10.60797/IRJ.2025.160.34.
60. Yang Z., Algesheimer R., Tessone C.J. A Comparative Analysis of Community Detection Algorithms on Artificial Networks // Scientific Reports. 2016. vol. 6. pp. 1–18. DOI: 10.1038/srep30750.

Сенкевич Юрий Игоревич — д-р техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, лаборатория акустических исследований, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук» (ИКИР ДВО РАН). Область научных интересов: обработка данных и выявление скрытых закономерностей в хранилищах данных, применение методов математики и информатики в геофизических исследованиях, разработка методов и программ обработки и анализа данных с применением нейросетевых технологий. Число научных публикаций — 117. senkevich@ikir.ru; ул. Мирная, 7, 684034, с. Паратунка, Россия; р.т.: +7(415)313-3193.

Мищенко Михаил Александрович — канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория акустических исследований, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук» (ИКИР ДВО РАН). Область научных интересов: подповерхностная геофизика, деформации, геоакустика, атмосферное электрическое поле, ЦОС. Число научных публикаций — 80. micle@ikir.ru; ул. Мирная, 7, 684034, с. Паратунка, Россия; р.т.: +7(415)313-3193.

Поддержка исследований. Исследование проведено в рамках госзадания Института космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН (проект № 124012300245-2).

Y. SENKEVICH, M. MISHCHENKO
**SEARCH FOR SPECIFIC CHANGES IN GEOACOUSTIC
EMISSION CHARACTERISTICS ASSOCIATED WITH STRONG
EARTHQUAKES IN KAMCHATKA**

Senkevich Y., Mishchenko M. Search for Specific Changes in Geoacoustic Emission Characteristics Associated with Strong Earthquakes in Kamchatka.

Abstract. The catastrophic consequences of strong earthquakes are a well-recognized hazard. Seismic processes associated with earthquake preparation in subduction zones induce deformation in the surface layers of the Earth's crust, including the sedimentary layer, where the phenomenon of acoustic oscillation generation, known as geoacoustic emission (GAE), is observed. The primary mechanism of GAE generation is associated with the movement of dislocations resulting from the interaction of fractions and their clusters within sedimentary rocks. Deformations in the sedimentary layer lead to changes in its physical properties and, consequently, to alterations in the conditions under which acoustic oscillations are generated. A relationship has been established between the degree of the stress-strain state of sedimentary rocks and the intensity of the pulsed GAE flux. The GAE signal constitutes a sequence of pulses with varying duty cycles, amplitudes, and waveforms. During periods of heightened seismic activity, changes in signal parameters are observed within the sedimentary rocks. A detailed study of the changes in the characteristics of signal fragments recorded during periods directly associated with the onset of earthquakes in Kamchatka, and the search for their distinctions from changes in signal fragments during periods unrelated to earthquakes, constituted the core of this research.

Keywords: sedimentary rocks, surface waves, geoacoustic emission, signal characteristic anomalies, anomaly classification, neural network image processing.

References

1. Shebalin P.N., Gvishiani A.D., Dzeboev B.A., Skorkina A.A. [Why are New Approaches to Seismic Hazard Assessment Required?]. *Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Nauki o Zemle – Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences.* 2022. vol. 507. no. 1. pp. 91–97. DOI: 10.31857/S2686739722601466. (In Russ.).
2. Spivak A.A., Rybnov Y.S. [Acoustic Effects of Strong Earthquakes]. *Fizika Zemli – Physics of the Earth.* 2021. no. 1. pp. 41–50. DOI: 10.31857/S0002333721010099. (In Russ.).
3. Sychev V.N., Bogomolov L.M. [The potential of nonlinear dynamics methods for analyzing geophysical series and seismicity.]. *Sb. nauchny'x statej VI Mezhdunarodnoj konferencii «Solnechno-zemny'e svyazi i fizika predvestnikov zemletryasenij».* 2013. pp. 78. (In Russ.).
4. Bogomolov L.M., Sycheva N.A. [Earthquake Predictions in XXI Century: Prehistory and Concepts, Precursors and Problems]. *Geosistemy' perexodny'x zon – Geosystems of Transition Zones.* 2022. vol. 6. no. 3. pp. 145–182. DOI: 10.30730/gtr.2022.6.3.145-164.164-182. (In Russ.).
5. Saltykov V.A., Kugaenko Y.A. [Development of Near-Surface Dilatancy Zones as a Possible Cause for Seismic Emission Anomalies Before Strong Earthquakes]. *Pacific Geology – Tixookenskaya geologiya.* 2012. vol. 31. no. 1. pp. 96–106. (In Russ.).
6. Chebotareva I.Y., Volodin I.A., Dryagin V.V. [Acoustic Effects in the Deformation of Structurally Inhomogeneous Media]. *Akusticheskij zhurnal – Acoustic Journal.* 2017. vol. 63. no. 1. pp. 84–93. DOI: 10.7868/S0320791916060046. (In Russ.).

7. Ponomarev A.V., Sobolev G.A. Fizika zemletryasenij i predvestniki [Physics of Earthquakes and Precursors]. M.: Nauka. 2003. 270 p. (In Russ.).
8. Muratov P.V., Rulenko O.P., Marapulets Yu.V., Solodchuk A.A. [Electrical and acoustic response of near-surface sedimentary rocks to the passage of seismic waves from earthquakes]. Vestnik KRAUNC. Fiziko-matematicheskie nauki – Bulletin of KRAUNTS. Physical and mathematical sciences. 2018. no. 5(25). pp. 62–73. DOI: 10.18454/2079-6641-2018-25-5-62-73. (In Russ.).
9. Gavrilov V.A. Vozdejstvie peremenny'x e'lektromagnitny'x polej na geokusticheskie processy': e'mpiricheskie zakonomernosti i fizicheskie mexanizmy' [The Effect of Variable Electromagnetic Fields on Geoacoustic Processes: Empirical Patterns and Physical Mechanisms]: special'nost' 25.00.10 «Geofizika, geofizicheskie metody' poiskov polezny'x iskopaemy'x»: avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni doktora fiziko-matematicheskix nauk. Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe uchrezhdenie nauki Institut vulkanologii i sejsmologii Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossijskoj akademii nauk (IViS DVO RAN). Petropavlovsk-Kamchatskij, 2017. 51 p. (In Russ.).
10. Segall P. Earthquake and Volcano Deformation. Princeton: Princeton University Press. 2010. 464 p.
11. Marapulets Y.V., Shevtsov B.M., Larionov I.A., Mishchenko M.A., Shcherbina A.O., Solodchuk A.A. [Geoacoustic Emission Response to Deformation Processes Activation During Earthquake Preparation]. Tixookeanskaya geologiya – Russian Journal of Pacific Geology. 2012. vol. 31. no. 6. pp. 59–67. (In Russ.).
12. Bogdanov V.V., Bychkov V.V., Vodinchar G.M. Dinamika fizicheskix processov v aktivny'x zonax blizhnego kosmosa i geosfer: izbranny'e raboty' 2018-2020 gg. [Dynamics of Physical Processes in Active Zones of Near Space and Geospheres: Selected Works 2018-2020] (Russ. ed.: Shevtsov B.M.) M.: RAN. 2021. 409 p. (In Russ.).
13. Senkevich Yu.I., Mishchenko M.A. [Methodology for assessing the condition of near-surface sedimentary rocks based on observations of dynamic characteristics of geoacoustic emission]. Vestnik KRAUNC. Fiziko-matematicheskie nauki – Bulletin of KRAUNTS. Physical and mathematical sciences. 2023. vol. 45. no. 4. pp. 109–121. DOI: 10.26117/2079-6641-2023-45-4-109-121. (In Russ.).
14. Senkevich, Y., Marapulets, Y., Lukovenkova, O., Solodchuk, A. [Technique of Informative Features Selection in Geoacoustic Emission Signals]. Trudy' SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings. 2019. vol. 18. no. 5. pp. 1066–1092. DOI: 10.15622/sp.2019.18.5.1066-1092. (In Russ.).
15. Baranov B.V., Tsukanov N.V., Gaedicke Ch., Freitag R., Dozorova K.A. [Morphology and Structural Features of the Subduction Zone in the Vicinity of Kuril-Kamchatka-Aleutian Junction]. Okeanologiya – Oceanology. 2022. vol. 62. no. 4. pp. 528–539. DOI: 10.31857/S0030157422040025. (In Russ.).
16. Avdeiko G.P., Palueva A.A. [Historic Analysis of Seismicity and Seismic Hazard of the Kamchatkan Subduction Zone]. Vestnik KRAUNC. Nauki o zemle – Bulletin of KRAUNTS. Earth sciences. 2010. no. 15(1). pp. 69–89. (In Russ.).
17. Safonov D.A. [Spatial Distribution of Tectonic Stress in the Southern Deep Part of the Kuril-Kamchatka Subduction Zone]. Geosistemy' perexodny'x zon – Geosystems of Transition Zones. 2019. vol. 3. no. 2. pp. 175–188. DOI: 10.30730/2541-8912.2019.3.2.175-188. (In Russ.).
18. Gapeev M.I., Marapulets Yu.V. [Modeling of zones of relative shear deformations before strong earthquakes in Kamchatka, which occurred in the period 2018-2021]. Vestnik KRAUNC. Fiziko-matematicheskie nauki – Bulletin of KRAUNTS. Physical and mathematical sciences. 2021. vol. 37. no. 4. pp. 53–66. DOI: 10.26117/2079-6641-2021-37-4-53-66. (In Russ.).

19. Senkevich Y., Mishchenko M., Solodchuk A. Observation of the State of the Near-surface Lithosphere Layer based on the Analysis of the Dynamics of the Geoaoustic Emission Signal Characteristics. *Proceedings of the IEEE 3rd International Conference on Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering (PIERE)*. 2024. pp. 1140–1143. DOI: 10.1109/PIERE62470.2024.10805026.
20. Senkevich Yu.I. [Processing and preparation of observational data in order to identify the features of the dynamics of geoaoustic emission characteristics]. *Vestnik KRAUNC. Fiziko-matematicheskie nauki – Bulletin of KRAUNTS. Physical and mathematical sciences*. 2024. vol. 47. no. 2. pp. 75–94. DOI: 10.26117/2079-6641-2024-47-2-75-94. (In Russ.).
21. Senkevich Yu.I., Mishchenko M.A., Solodchuk A.A., Lukovenkova O.O., Gapeev M.I. [Stochastic modeling of geoaoustic emission signal]. *Cifrovaya obrabotka signalov – Digital signal processing*. 2023. no. 1. pp. 27–34. (In Russ.).
22. Patent RU 2758582 C1. [A method for detecting a complex earthquake precursor]: №2020138668: zayavl. 26.11.2020: opubl. 29.10.2021. Senkevich Yu.I., Marapulets Yu.V., Lukovenkova O.O., Solodchuk A.A., Mishchenko M.A., Malkin E.I., Gapeev M.I. (In Russ.).
23. Builo S.I. *Fiziko-mexanicheskie, statisticheskie i aspekty` akustiko-e`missionnoj diagnostiki: monografiya* [Physical and mechanical, statistical, and aspects of acoustic emission diagnostics: a monograph]. Taganrog: Izd-vo Yuzhnogo federal'nogo universiteta. 2017. 182 p. (In Russ.).
24. Greshnikov V.A. *Akusticheskaya e`missiya. Primenenie dlya ispy`taniy materialov i izdelij* [Physical and mechanical, statistical, and aspects of acoustic emission diagnostics: a monograph]. M.: Izd-vo standartov. 1976. 272 p. (In Russ.).
25. Semashko N.A., Shport V.I., Maryin B.N. *Akusticheskaya e`missiya v e`ksperimental'nom materialovedeni* [Acoustic Emission in Experimental Materials Science]. M.: Mashinostroenie. 2002. 239 p. (In Russ.).
26. Grosse C.U., Ohtsu M., Aggelis D.G., Shiotani T. *Acoustic Emission Testing*. Springer Tracts in Civil Engineering. Springer. 2022. 746 p. DOI: 10.1007/978-3-030-67936-1.
27. Berezina Yu.A., Spodarevab L.A. [Propagation of acoustic signals in soils]. *Prikladnaya Mekhanika i Tekhnicheskaya Fizika – Applied mechanics and technical physics*. 2001. vol. 42. no. 4(248). pp. 177–183. (In Russ.).
28. Ou J., Wang E., Wang X., et al. Acoustic emission characteristics and damage evolution of different rocks under uniaxial compression conditions. *Scientific Reports*. 2024. vol. 14. pp. 1–10. DOI: 10.1038/s41598-024-54950-9.
29. Lockner D. The Role of Acoustic Emission in the Study of Rock Fracture. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1993. vol. 30. no. 7. pp. 883–899.
30. Xiangguo K., Enyuan W., Xueqiu H., et. al. Multifractal characteristics and acoustic emission of coal with joints under uniaxial loading. *Fractals*. 2017. vol. 25. no. 5. pp. 1–11. DOI: 10.1142/S0218348X17500451.
31. Carpinteri A., Lacidogna G., Puzzi Si. From criticality to final collapse: Evolution of the “b-value” from 1.5 to 1.0. *Chaos, Solitons & Fractals*. 2009. vol. 41. pp. 843–853 DOI: 10.1016/j.chaos.2008.04.010.
32. Guarino A., Garcimartin A., Ciliberto S. An experimental test of the critical behaviour of fracture precursors. *The European Physical Journal B – Condensed Matter and Complex Systems*. 1998. vol. 6. pp. 13–24. DOI: 10.1007/s100510050521.
33. Morozova K.G. *Sejsmoakusticheskaya e`missiya, soprovozhdayushhaya razlichny`e rezhimy` skol'zheniya po razlomam i treshhinam* [Seismoacoustic emission accompanying various modes of sliding along faults and fractures]: special'nost' 1.6.9 «Geofizika»: avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni doktora

- fiziko-matematicheskix nauk. Institut dinamiki geosfer imeni akademika M.A. Sadovskogo Rossijskoj akademii nauk (IDG RAN). Moskva, 2023. 144 p. (In Russ.).
34. Sheremetyeva O.V., Shevtsov B.M. [Approximation of the laws of the distribution of waiting times for foreshocks based on a fractional model of deformation activity]. Vestnik KRAUNC. Fiziko-matematicheskie nauki – Bulletin of KRAUNTS. Physical and mathematical sciences. 2022. vol. 40. no. 3. pp. 137–152. DOI: 10.26117/2079-6641-2022-40-3-137-152. (In Russ.).
 35. Mileshekin M.B., Biblik I.V., Stoev P.I. [Analysis of the amplitude distribution of acoustic emission signals based on the computational and experimental method]. Fizicheskaya mezomechanika – Physical Mesomechanics. 2004. vol. 7. no. S1-1. pp. 206–209. (In Russ.).
 36. Lacoste M., Ruiz S., Or D. Listening to earthworms burrowing and roots growing – acoustic signatures of soil biological activity. Scientific Reports. 2018. vol. 8. pp. 1–9. DOI: 10.1038/s41598-018-28582-9.
 37. Kocharyan G.G., Ostapchuk A.A. [Acoustic Emission During Different-Type Inter-Block Movements]. Fiziko-technicheskie problemy razrabotki polezny'x iskopaemy'x – Physico-technical problems of mining. 2015. no. 1. pp. 3–13. (In Russ.).
 38. Baranov S.V. [Estimating Aftershock Process Activity by Gutenberg-Richter Law and Etas Model]. Fundamental'ny'e issledovaniya – Fundamental Research. 2014. no. 12. pp. 751–755. (In Russ.).
 39. Baro J., Corral A., Illa X., et al. Statistical Similarity between the Compression of a Porous Material and Earthquakes. Physical Review Letters. 2013. vol. 110. 088702 p. DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.088702.
 40. Sedghizadeh M., Van Den Bergh M., Shcherbakov R. Statistical and clustering analysis of microseismicity from a Saskatchewan potash mine. Frontiers in Applied Mathematics and Statistics. 2023. vol. 9. 1126952 p. DOI: 10.3389/fams.2023.1126952.
 41. Turuntaev S.B. Kinetika texnogennoj sejsmichnosti [Kinetics of Anthropogenic Seismicity]: special'nost' 25.00.10 «Geofizika, geofizicheskie metody poiskov polezny'x iskopaemy'x»: avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni doktora fiziko-matematicheskix nauk. Institut fiziki Zemli im. O. Yu. Shmidta RAN (IFZ RAN). Moskva, 2005. 330 p. (In Russ.).
 42. Mishchenko M.A., Marapulets Yu.V., Larionov I.A. [Analysis of time and frequency characteristics of simultaneous geodeformation signals at the "Karymshina" observation point]. Vestnik KRAUNC. Fiziko-matematicheskie nauki – Bulletin of KRAUNTS. Physical and mathematical sciences. 2019. vol. 29. no. 4. pp. 166–172. DOI: 10.26117/2079-6641-2019-29-4-166-172. (In Russ.).
 43. Marapulets Y., Solodchuk A., Shcherbina A. Changes of geoacoustic emission directivity at «Mikizha» site associated with earthquakes in Kamchatka. Proceedings of the VII International Conference Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquakes precursors. 2016. 5 p. DOI: 10.1051/e3sconf/20161100014.
 44. Feller K.R., Abercrombie R.E., Ekstrom G. A Common Origin for Aftershocks, Foreshocks, and Multiplets. Bulletin of the Seismological Society of America. 2004. vol. 94. no. 1. pp. 88–98. DOI: 10.1785/0120030069.
 45. Ivanov V.I., Barat V.A. Akustiko-e'missionnaya diagnostika (spravochnik) [Acoustic Emission Diagnostics (reference book)]. M.: Spektr. 2017. 362 p. (In Russ.).
 46. Shcherbina A.O., Solodchuk A.A. [Localization of Acoustic Radiation Sources According to a Distributed System of Combined Receivers]. Vestnik KRAUNC. Fiziko-matematicheskie nauki – Bulletin of KRAUNTS. Physical and mathematical sciences. 2023. vol. 44. no. 3. pp. 144–156. DOI: 10.26117/2079-6641-2023-44-3-144-156. (In Russ.).
 47. Senkevich Y., Mishchenko M., Solodchuk A. Observation of the State of the Near-surface Lithosphere Layer based on the Analysis of the Dynamics of the Geoacoustic Emission Signal Characteristics. Proceedings of the IEEE 3rd

- International Conference on Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering (PIERE). 2024. pp. 1140–1143. DOI: 10.1109/PIERE62470.2024.10805026.
48. Project RNF 18-11-00087. [Comprehensive analysis of acoustic and electromagnetic signals to assess the level of seismic hazard and prevent natural and man-made disasters]. 2021. (In Russ.).
49. Tatevosyan R.E. Aftershock. The Great Russian Encyclopedia: a scientific and educational portal. Available at: <https://bigenc.ru/c/aftershok-b80b0f/?v=5911142> (accessed 25.01.2026). (In Russ.).
50. Bogomolov L.M., Rodkin M.V., Sychev V.N. [Instanton Representation of Foreshock-Aftershock Sequences]. *Fizika Zemli – Physics of the Earth*. 2025. no. 2. pp. 43–57. DOI: 10.7868/S3034645225020045. (In Russ.).
51. Certificate of state registration of the database №2017620097 dated 19.01.2017. [Database "Geodeformation observations in the Karymshina River valley (Kamchatka Peninsula)"]. Larionov I.A., Mishchenko M.A. (In Russ.).
52. Tsirel S.B. Dilatation in soils. The Great Russian Encyclopedia: a scientific and educational portal. Available at: <https://bigenc.ru/c/dilatansia-v-gruntakh-792dde> (accessed 25.01.2026) (In Russ.).
53. Mirny A.Yu. [Disperse soils dilatancy studies and the methods of its quantitative assessment]. *Inzhenernaya geologiya – Engineering Geology World*. 2019. vol. 14. no. 2. pp. 34–43. DOI: 10.25296/1993-5056-2019-14-2-34-43. (In Russ.).
54. Certificate of state registration of the database №2017621061 dated 20.09.2017. ["Anomalous disturbances of high-frequency geoacoustic emission at the observation points "Mikizha" and "Karymshina" (Kamchatka Peninsula)"]. Mishchenko M.A., Larionov I.A. (In Russ.).
55. Certificate of state registration of the database №2018621109 dated 19.07.2018. [Database "Geoacoustic and deformation anomalies in the Karymshina River Valley (Kamchatka Peninsula)"]. Larionov I.A., Mishchenko M.A. (In Russ.).
56. Earthquake Catalog of Kamchatka and the Commander Islandsio Kamchatka Branch of the Russian Academy of Sciences. Available at: <http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php> (accessed 25.01.2026). (In Russ.).
57. Mingalev A.V. [Method and algorithms of processing scanner thermal images based on high-accuracy neural networks for automatic detection of specified types of objects]. *Vestnik Ryazanskogo Gosudarstvennogo Radiotekhnicheskogo Universiteta – Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*. 2025. no. 91. pp. 158–167. DOI: 10.21667/1995-4565-2025-91-158-167. (In Russ.).
58. Uvaysov S.U., Chernoverskaya V.V., Dang N.V., Tuan N.V. [The use of an artificial neural network in thermal diagnostics of the printed node of the on-board take-off control device of an aircraft]. *Modelirovanie, optimizaciya i informacionny'e texnologii – Modeling, optimization and information technology*. 2022. vol. 10. no. 3(38). pp. 23–24. DOI: 10.26102/2310-6018/2022.38.3.012. (In Russ.).
59. Nabatov N.N., Yerachina S.M. [The use of convolutional neural networks for noise removal and image restoration in medical and telemetrical practice]. *Mezhdunarodny'j nauchno-issledovatel'skij zhurnal – International Research Journal*. 2025. no. 10(160). pp. 1–14. DOI: 10.60797/IRJ.2025.160.34. (In Russ.).
60. Yang Z., Algesheimer R., Tessone C.J. A Comparative Analysis of Community Detection Algorithms on Artificial Networks. *Scientific Reports*. 2016. vol. 6. pp. 1–18. DOI: 10.1038/srep30750.

Senkevich Yuriy — Ph.D., Dr.Sci., Associate Professor, Leading Researcher, Laboratory of Acoustic Research, Federal State Budgetary Institution of Science «Institute of Space Physics Research and Radio Wave Propagation of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences» (IKIR FEB RAS). Research interests: data processing and identification of hidden

patterns in data repositories, application of mathematical and computer science methods in geophysical research, development of methods and programs for data processing and analysis using neural network technologies. The number of publications — 117. senkevich@ikir.ru; 7, Mirnaya St., 684034, Paratunka Vill., Russia; office phone: +7(415)313-3193.

Mishchenko Michael — Ph.D., Leading researcher, Laboratory of acoustic research, Federal State Budgetary Institution of Science «Institute of Space Physics Research and Radio Wave Propagation of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences» (IKIR FEB RAS). Research interests: near-surface geophysics, deformations, geoacoustics, atmospheric electric field, digital signal processing. The number of publications — 80. micle@ikir.ru; 7, Mirnaya St., 684034, Paratunka Vill., Russia; office phone: +7(415)313-3193.

Acknowledgements. This study was conducted as part of a government assignment from the Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, FEB RAS (Project No. 124012300245-2).