

УДК 550.344.094:550.344.094.83:550.348.432

СТОХАСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛА ГЕОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ*Сенкевич Ю.И., Институт космофизических исследований и распространения радиоволн, ведущий научный сотрудник, д.т.н, e-mail: senkevich@ikir.ru**Мищенко М.А., Институт космофизических исследований и распространения радиоволн, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н., e-mail: micle@ikir.ru**Солодчук А.А., Институт космофизических исследований и распространения радиоволн, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н., e-mail: aleksandra@ikir.ru**Луковенкова О.О., Институт космофизических исследований и распространения радиоволн, старший научный сотрудник, к.т.н., e-mail: o.o.lukovenkova@yandex.ru**Гапеев М.И., Институт космофизических исследований и распространения радиоволн, младший научный сотрудник, e-mail: gapeev@ikir.ru***STOCHASTIC MODELING OF GEOACOUSTIC EMISSION PULSE SIGNAL***Senkevich Yu.I., Mishchenko M.A., Solodchuk A.A., Lukovenkova O.O., Gapeev M.I.*

This work is carried out as a part of the study of processes occurring at different stages of the seismic activity in Kamchatka region. One of the indicators of seismic activity is changing of the characteristics of geoacoustic emission, which is produced by near-surface sedimentary rocks. The authors propose a stochastic model of pulse geoacoustic emission model recorded by a point receiver in a homogenous and isotropic medium. The model parameters are three random variables. They are pulse amplitude, inter-pulse interval and pulse duration. To analyze the proposed model, the technique of constructing three-dimensional graphs of the distributions of each parameter is developed, which allows us to identify features of the parameter behavior over time. The technique is tested on an artificial signal, which is a flow of pulses with different distribution laws of the parameters. Applying the developed technique to real data, the authors revealed anomalies of the parameter distribution of geoacoustic pulse flow, which allow to get new knowledge about effect of seismic processes on the acoustic field of near-surface sedimentary rocks.

Key words: seismic activity in Kamchatka region, geoacoustic emission, stochastic model, homogenous and isotropic medium, anomalies of the parameter distribution.

Ключевые слова: сейсмическая активность, геоакустическая эмиссия, стохастическая модель импульсного сигнала, аномалии распределения параметров, структурно-лингвистический анализ.

Введение

Предупреждение угрозы землетрясений и цунами остается важнейшей проблемой мирового значения. Для изучения механизмов формирования таких явлений необходимо учитывать особенности сейсмотектонического процесса в конкретном регионе [1-10].

Начиная с 2001 г., в пункте ИКИР ДВО РАН «Карымшина» (52.83 с.ш., 158.13 в.д.) проводятся наблюдения, направленные на получение знаний о деформационных процессах в приповерхностных осадочных породах. Здесь выполняются комплексные исследования сигналов геоакустической эмиссии (ГАЭ) на разных стадиях сейсмотектонического процесса в Камчатском регионе [11-15]. Сигналы ГАЭ представляют собой упругие волны, которые излучаются в результате динамической перестройки структуры приповерхностных осадочных пород, находящихся в напряженно-деформированном состоянии под действием сейсмотектонического процесса, приливных волн и др. Обработка и анализ таких сигналов представляют определенные трудности, связанные с их нестационарностью и нелинейностью, а также

Настоящая работа проводится в рамках исследования акустической эмиссии пород на разных стадиях сейсмотектонического процесса в Камчатском регионе. Одним из индикаторов сейсмической активности является изменение характеристик геоакустической эмиссии, генерируемой приповерхностными осадочными породами. Авторами предложена стохастическая модель сигнала геоакустической эмиссии, регистрируемого точечным приемником в условиях однородной и изотропной среды. Параметрами модели являются три случайные величины – амплитуда импульсов, межимпульсный интервал, длительность импульса. Для анализа предложенной модели разработана методика построения трехмерных графиков распределений каждого из параметров, позволяющая выделять особенности их поведения во времени. Апробация методики проведена на искусственном сигнале с различными законами распределения параметров. Применяя разработанную методику к реальным данным, авторы выявили аномалии в распределении параметров потока геоакустических импульсов, которые позволили получить новые знания о влиянии сейсмических процессов на акустическое поле в приповерхностных осадочных породах.

влиянием на их характеристики целого ряда природных факторов. Научный интерес представляет поиск различных природных и техногенных факторов, определяющих генерацию акустических сигналов в приповерхностных осадочных породах в пункте наблюдений. Задача настоящего исследования состоит в разработке методики выявления аномальных изменений параметров сигнала ГАЭ на разных временных масштабах наблюдения.

Переход от аналитической к стохастической модели

Рассмотрим условия приема сигнала ГЭ. Акустический приемник – гидрофон, установленный в пункте наблюдений у дна искусственного водоема на глубине 1 м. Схема приема сигнала ГЭ в точке размещения гидрофона представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема приема сигнала геоакустической эмиссии в пункте наблюдений «Карымшина»

Положим, что среда, в которой осуществляется генерация импульсов ГЭ, однородна и изотропна в пределах нижней полусферы радиуса R сферической диаграммы направленности приемного акустического датчика, а сам датчик точечный. Радиус полусферы приема на практике определяется уровнем сопутствующих шумов и сигналов в пределах полосы пропускания приемной аппаратуры, ее чувствительностью и возможностями алгоритмов обработки. В качестве аналитической модели импульса ГЭ возьмем простую функцию затухающего колебания (рис. 2)

$$s(t) = A \exp(-\delta t) \sin(\omega t + \varphi),$$

где A – амплитуда, δ – коэффициент затухания, ω – начальная фаза.

Наблюдаемый сигнал ГЭ представляет поток релаксационных импульсов с меняющимися значениями параметров. Учитывая значительное затухание сигнала в осадочных породах коэффициент затухания k в изверженных, метаморфических и осадочных породах в среднем составляет от $0,001$ до $0,01 \text{ м}^{-1}$, в рыхлых осадочных – от $0,001$ до $0,5 \text{ м}^{-1}$ и величину скорости продольных колебаний с частотой в диапазоне $f = 20 \text{ Гц} - 20 \text{ кГц}$ равную $c = 0,2 - 1,8 \cdot 10^3 \text{ м/с}$ [16-18], радиус R нижней полусферы приема сигнала составляет от 5 до 15 м.

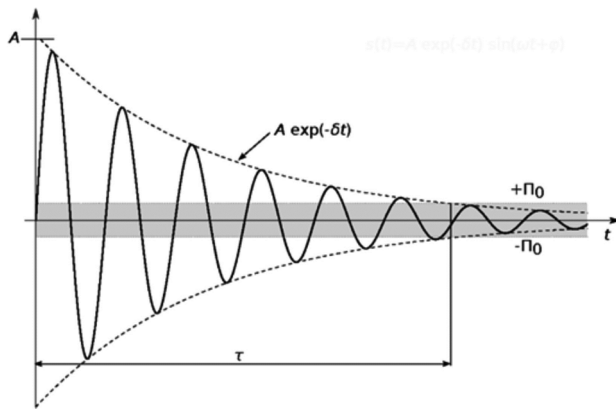


Рис. 2. Аналитическая модель одиночного импульса ГЭ.

τ – длительность импульса,

Π_0 – порог чувствительности приемной аппаратуры

В условиях наблюдения реального сигнала ГЭ присутствует аддитивная нестационарная помеха – непрерывные естественные и эпизодические техногенные шумы, которые устраняются классическими методами полосовой фильтрации и применением плавающего порога Π_0 , настраиваемого под уровень мешающих помех. В силу быстрого затухания акустического сигнала в вязких и сыпучих средах число импульсов n , достигнувших приемной аппаратуры, будет уменьшаться обратно пропорционально квадрату расстояния от точки генерации импульса до точки его приема. Поэтому $n \ll N$, где N – число всех потенциальных одиночных источников излучения. Принимая условия однородности и изотропности среды, можно полагать, что в отсутствие внешнего воздействия источники геоакустических импульсов распределены в ней равномерно с плотностью ρ . Тогда общее число потенциальных источников импульсов, находящихся в зоне приема составит

$$n = \frac{2}{3} \pi R^3 \rho.$$

Сигнал на входе акустического приемника без учета помех формируется как сумма импульсов ГЭ от одиночных источников в зоне приема

$$s(t) = \sum_{i=1}^n s_i(t-t_i) = \sum_{i=1}^n A_i \exp(-\delta_i(t-t_i)) \sin(\omega_i(t-t_i) + \varphi_i),$$

где n – число импульсов; A_i – амплитуда импульса, сгенерированного i -м источником; δ_i – коэффициент затухания амплитуды импульса (влияет на форму огибающей импульса); t_i – время регистрации i -го импульса; ω_i – круговая частота; φ_i – начальная фаза.

В представленной работе авторы рассматривают параметры, характеризующие импульсы только во временной области, поэтому далее будет использоваться упрощенная модель, не учитывающая частотно-фазовую модуляцию импульсов,

$$s(t) = \sum_{i=1}^n A_i \exp(-\delta_i(t-t_i)). \quad (1)$$

Можно выделить три параметра импульсного сигнала, характеризующие состояние среды, в которой сгенерированы и через которую распространяются импульсы: множество амплитуд импульсов $\{A_i\}$, множество межимпульсных интервалов $\{\Theta_i\}$ и множество длительностей импульсов $\{\tau_i\}$. Важно понять, какую информацию эти множества переносят и как ее можно извлечь.

Межимпульсные интервалы вычисляются как разность времени регистрации для каждой пары соседних импульсов $\{\Theta_i\} = t_i - t_{i-1}$. Тогда время регистрации i -го импульса τ_i можно представить в виде суммы межимпульсных интервалов.

$$t_i = \sum_{k=1}^i t_k - t_{k-1} = \sum_{k=1}^i \Theta_k, \text{ где } \Theta_i = t_i. \quad (2)$$

Длительность τ_i импульса вычисляется как время от момента регистрации импульса до момента, когда функция огибающей импульса пересечет порог обнаружения Π_0 .

$$A_i \exp(-\delta_i(t_i + \tau_i)) = \Pi_0. \quad (3)$$

С учетом (2) параметр δ_i может быть выражен из (3) как

$$\delta_i = \frac{\log \frac{A_i}{\Pi_0}}{\sum_{k=1}^i \Theta_k + \tau_i}. \quad (4)$$

При отсутствии явных воздействий на среду существует незначительная фоновая активность ГАЭ. Как показано в [17, 19], для осадочных пород, к которым, в частности, относятся породы в пункте «Карымшина» [9], активность зависит от состава и размера включенных фракций, насыщенности водой и скорости протекания деформационных процессов в слое. В этом случае вероятность излучения импульса становится функцией многих переменных. Параметры сигналов ГАЭ непосредственно связаны с деформационным процессом [11, 12]. В частности, частота генерации импульсов связана с масштабами источников при пластической деформации [17–19]. Количество импульсов за определенный период наблюдений, а следовательно, и величина межимпульсных интервалов будут меняться в зависимости от скорости протекания деформационного воздействия.

Опираясь на результаты исследований по статистической оценке параметров сигнала ГАЭ [9, 11, 12, 14], будем рассматривать поток импульсов как стохастический процесс и оценивать его параметры с позиции теории вероятности. Запишем параметры импульса ГАЭ следующими выражениями: для случайной амплитуды i -го импульса $A_i^{(p)} = A_{\max} p_A$, где A_{\max} – максимально наблюдаемая амплитуда в потоке импульсов ГАЭ, p_A – случайное число в пределах 0–1; для i -го межимпульсного интервала $\Theta_i^{(p)} = \Theta_{\max} p_{\Theta}$, где Θ_{\max} – максимально возможный межимпульсный интервал в потоке импульсов ГАЭ, p_{Θ} – случайное число в пределах 0–1; для длительности i -го импульса $\tau_i^{(p)} = \tau_{\max} p_{\tau}$, где τ_{\max} – максимально возможное значение длительности импульса, наблюдаемое в потоке импульсов ГАЭ, p_{τ} –

случайное число в пределах 0–1. По аналогии с аналитической моделью (1) составим стохастическую модель импульсного потока ГАЭ, параметрами которой являются три случайные величины: амплитуда импульсов A , межимпульсный интервал Θ и длительность импульса τ соответственно.

$$s_p(A, \Theta, \tau) = \sum_{i=1}^n s_i(A_i^{(p)}, \Theta_i^{(p)}, \tau_i^{(p)}), \quad (5)$$

где с учетом (2) и (4)

$$s_i(A_i^{(p)}, \Theta_i^{(p)}, \tau_i^{(p)}) = A_i^{(p)} \exp \left[\frac{\log \frac{A_i^{(p)}}{\Pi_0}}{\sum_{k=1}^i \Theta_k^{(p)} + \tau_i^{(p)}} \left(t - \sum_{k=1}^i \Theta_k^{(p)} \right) \right].$$

Такое представление (5) позволяет отойти от рассмотрения аналитической функции сигнала и перейти к анализу динамики оценок параметров. Однако стоит отметить, что использование при анализе длительных периодов наблюдений может маскировать быстротекущие изменения характеристик сигнала.

Анализ результатов стохастического моделирования

Для анализа результатов моделирования сигнала ГАЭ была разработана методика. В основе методики лежит составление и последующий анализ трехмерных графиков распределений каждого из параметров модели (5). Трехмерный график представляет собой матрицу, где каждый столбец отображает гистограммы распределения выбранного параметра в заданной шкале интервалов. Гистограммы вычисляются последовательно в непересекающихся окнах выбранной длительности для отдельных фрагментов сигнала, рассчитанные значения частоты вносятся в столбцы матрицы. На графике значения частоты отображаются цветом в соответствии с выбранной цветовой шкалой. Схема формирования трехмерного графика представлена на рис. 3.

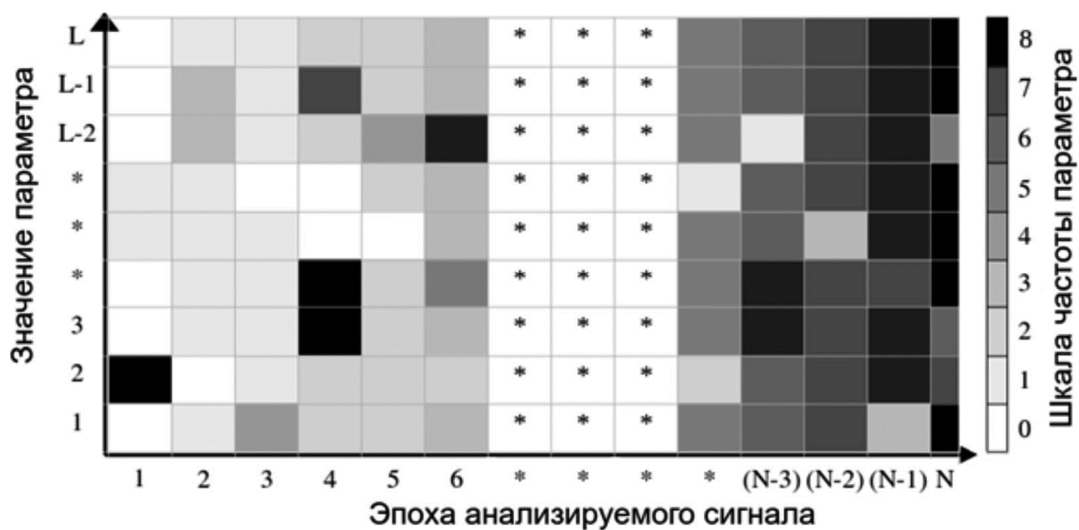


Рис. 3. Схема формирования трехмерного графика распределения параметров сигнала ГАЭ

Таблица 1. Параметры законов распределения

	Нормальное распределение	Пуассоновское распределение	Экспоненциальное распределение
Амплитуда	$\mu = 0,5728$ $\sigma = 0,1294$	$\lambda = 5,5661$	$\lambda = 0,2494$
Длительность	$\mu = 0,0035$ $\sigma = 0,0004$	$\lambda = 413,7592$	$\lambda = 0,0025$
Межимпульсный интервал	$\mu = 6444,508$ $\sigma = 1726,5741$	$\lambda = 0,0002$	$\lambda = 6444,5613$

Существуют распространенные аналоги таких графиков, использующиеся для анализа последовательностей мгновенных спектров, визуализации преобразования Гильберта-Хуанга [20, 21], результатов вейвлет-анализа и др. [22]. Получаемые графики демонстрируют эволюцию наблюдаемых параметров во времени, позволяя оценивать реакцию ГАЭ на сложные природные процессы. В ходе сравнительного анализа графиков удалось выделить распределения с различной динамикой параметров ГАЭ.

Тестирование стохастической модели

Для демонстрации возможностей разработанной методики ниже представлены графики распределений, построенные для искусственных сигналов с различными функциями распределения параметров: амплитуды A (в относительных единицах на интервале (0; 1]), длительности τ (в секундах на интервале [0,002; 0,005]), межимпульсного интервала Θ (в отсчетах; задается таким образом, чтобы количество импульсов составляло от 2000 до 3000 за 15 минут в соответствии с реальными сигналами):

– по нормальному закону

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right),$$

– по экспоненциальному закону

$$f(x) = \lambda \exp(-\lambda x),$$

– по закону Пуассона

$$f(k) = \frac{\exp(-\lambda)\lambda^k}{k!}.$$

Данные законы имитируют распределения параметров импульсного потока, которые можно встретить в наблюдаемых сигналах ГАЭ.

Для каждого из исследуемых параметров ГАЭ были сгенерированы сигналы длительностью 1 месяц. Они включали участки с законами распределения выбранного параметра в указанной последовательности: нормальным, экспоненциальным, нормальным, пуассоновским и нормальным. Параметры законов распределения приведены в табл. 1. На рис. 4-6 представлены трехмерные графики распределений, построенные для полученных сигналов. Длительность временного окна составляла 1 час. По представленным графикам заметны отличия в законах распределения параметров потока импульсов.

В ходе апробации настоящей методики были рассчитаны гистограммы распределений во временном окне длительностью 1 сутки за период с сентября 2016 г. по декабрь 2021 г. Построенные для каждого из параметров трехмерные графики сопоставлялись между собой. Это позволило комплексно подойти к оценке обнаруженных на графиках аномалий (рис. 7, 8).

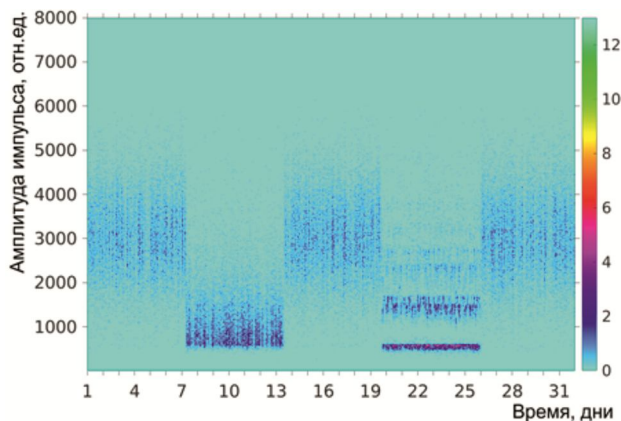


Рис. 4. Динамика распределения амплитуд импульсов, сгенерированных по нормальному (1–6, 14–20 и 26–31 дни), экспоненциальному (7–13 дни) и пуассоновскому законам (20–25 дни). Цветом обозначена частота значений амплитуды

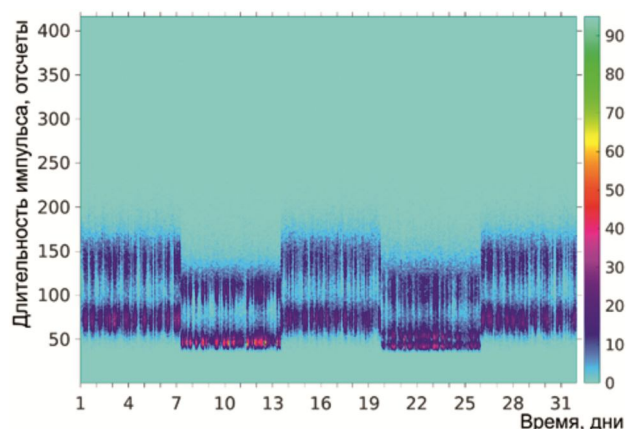


Рис. 5. Динамика распределения длительностей импульсов, сгенерированных по нормальному (1–6, 14–20 и 26–31 дни), экспоненциальному (7–13 дни) и пуассоновскому законам (20–25 дни). Цветом обозначена частота значений длительности

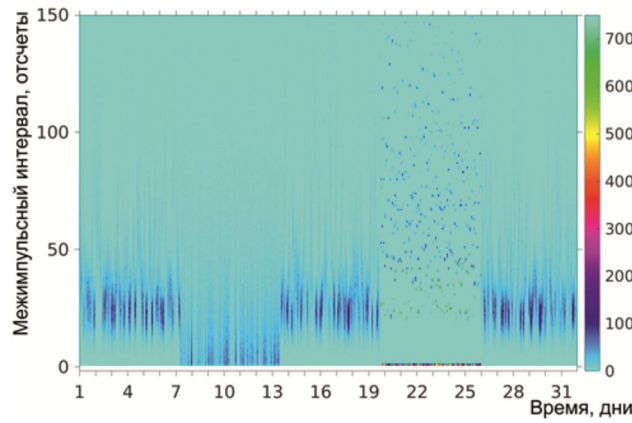


Рис. 6. Динамика распределения межимпульсных интервалов, сгенерированных по нормальному (1–6, 14–20 и 26–31 дни), экспоненциальному (7–13 дни) и пуассоновскому законам (20–25 дни). Цветом обозначена частота значений межимпульсных интервалов

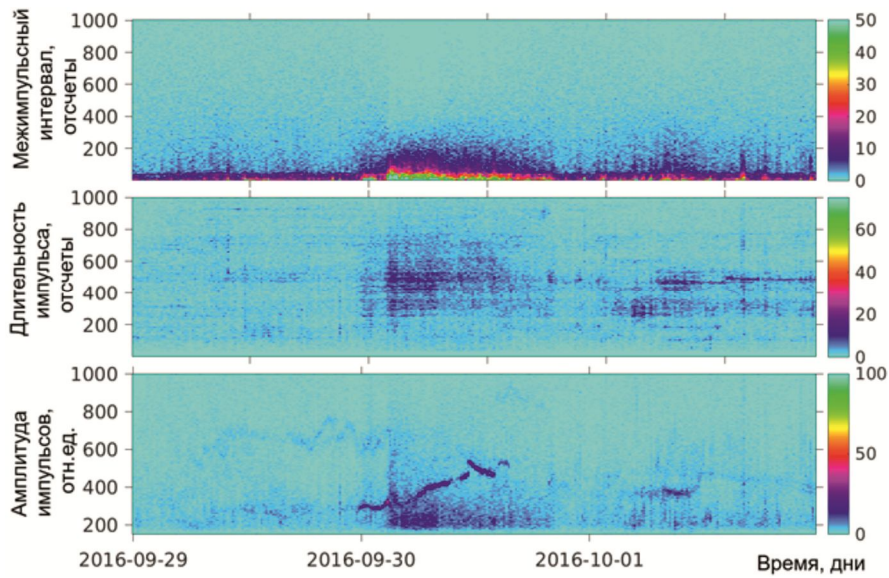


Рис. 7. Примеры аномалий в распределениях параметров сигнала ГАЭ. Цветом обозначена частота значений соответствующего параметра

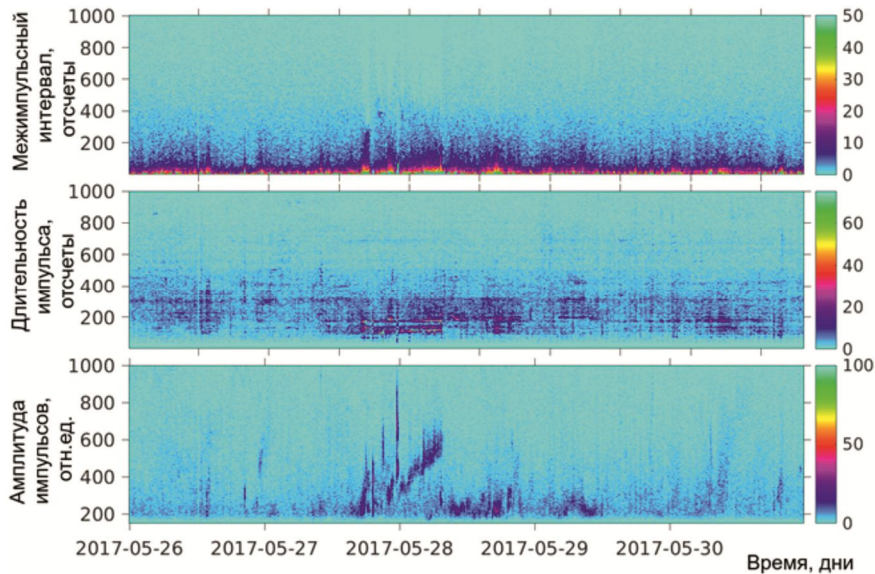


Рис. 8. Примеры аномалий в распределениях параметров сигнала ГАЭ. Цветом обозначена частота значений соответствующего параметра

Расширение области применения методики анализа результатов моделирования

Помимо выше перечисленных примеров описанная методика может применяться для анализа динамики других параметров, например, формы импульсов ГАЭ. Описание формы импульсов ГАЭ выполняется в два этапа. На первом этапе импульс преобразуется в кодовую последовательность. Данное преобразование выполняется методом структурно-лингвистического анализа [23]. Для каждого импульса определяются его локальные экстремумы. Далее строятся бинарные матрицы, содержащие результаты сравнения амплитуд и расстояний между локальными экстремумами (0 означает «меньше или равно», 1 означает «больше»). Эта матрица описывает форму импульса и называется «матрицей-образом». Схожесть формы определяется по количеству совпадающих элементов двух матриц. Близкие по форме импульсы формируют классы, описываемые единой матрицей-образом. Эта матрица описывает амплитудно-фазовую структуру членов класса. Матрицы-образы сортируются по возрастанию их порядков. Упорядоченная последовательность таких матриц называется «алфавитом», а сами матрицы – «символами». Состав алфавита отражает разнообразие импульсов на заданном периоде времени, при этом для каждой матрицы-образа можно определить ее частоту.

На втором этапе для алфавитов с использованием предлагаемой методики строятся трехмерные графики. В качестве параметра выбирается порядок матрицы-образа, а цветом обозначается частота. Для тестирования были сгенерированы два искусственных сигнала

длительностью 30 дней с нормальным, экспоненциальным и пуассоновским законами распределения межимпульсных интервалов. Параметры законов распределения представлены в табл. 1.

Первый сигнал включал участок с нормальным распределением межимпульсных интервалов (1–10 дни), участок с распределением по закону Пуассона (11–21 дни) и участок с экспоненциальным распределением (22–30 дни). Второй сигнал включал участок с экспоненциальным распределением межимпульсных интервалов (1–5 дни), участки с нормальным распределением (6–10 и 22–26 дни) и участки с распределением по закону Пуассона (11–21 и 27–30 дни). Алфавиты рассчитывались во временном окне длительностью 1 сутки.

Представленная методика сравнивалась с классическим методом спектрограмм, широко распространенным в геофизике. Для оценки спектральной плотности мощности сигналов применялся метод Уэлча со следующими параметрами: длина окна – 1 сутки, количество точек для расчета быстрого преобразования Фурье – 2048, для сглаживания краевых эффектов использовалось окно Хэмминга.

Результаты вычислительного эксперимента показаны на рис. 9. Методика, предлагаемая авторами, в отличие от метода спектрограмм позволяет идентифицировать аномалии, связанные с изменениями в законе распределения межимпульсных интервалов. В моменты изменения закона графики распределений алфавитов сигналов (рис. 9 а, б) меняют форму и тональность, в то время как на спектрограммах никакие изменения не заметны (рис. 9 в, г).

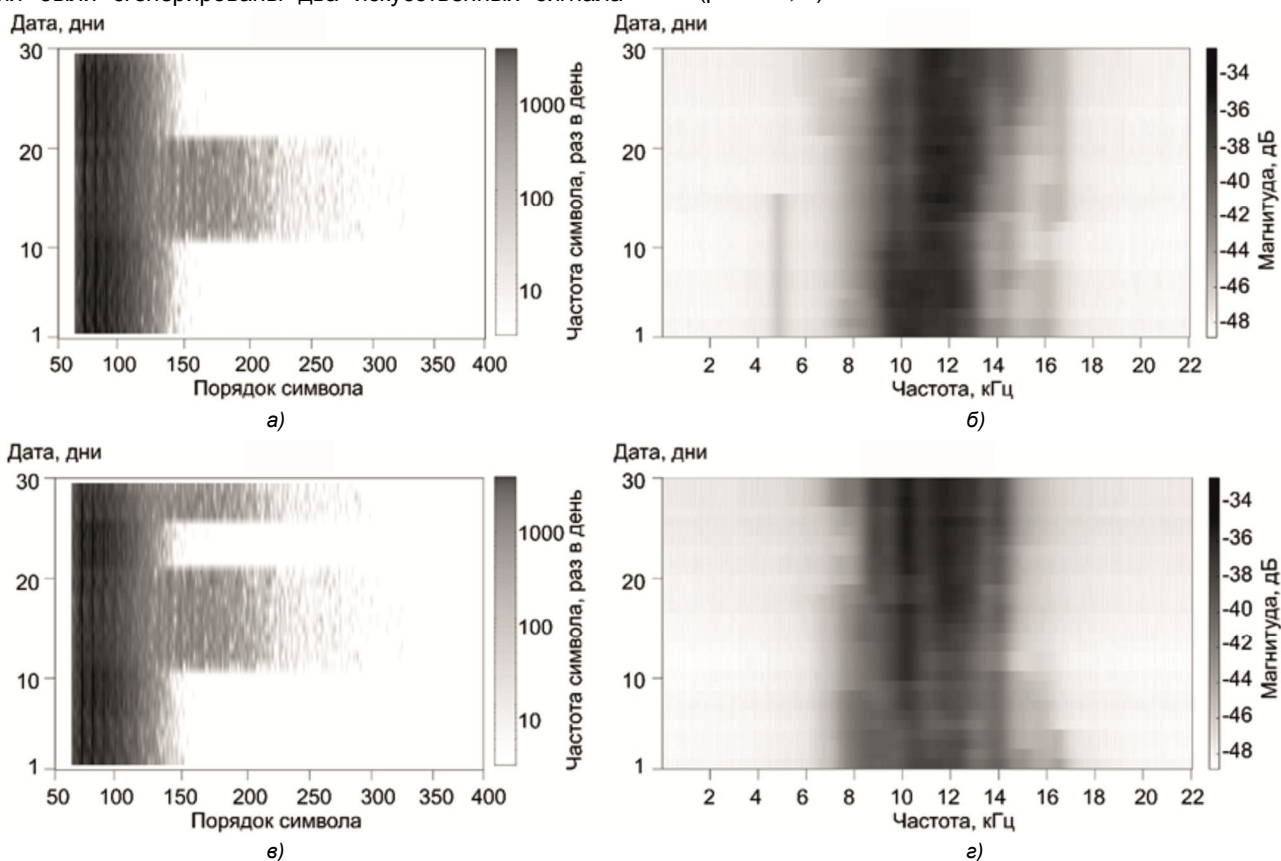


Рис. 9. Сравнение способов поиска аномалий на примере анализа искусственных сигналов ГАЭ с меняющимся законом распределения межимпульсных интервалов: (а), (б) – предлагаемая авторами методика, (в), (г) – метод спектрограмм

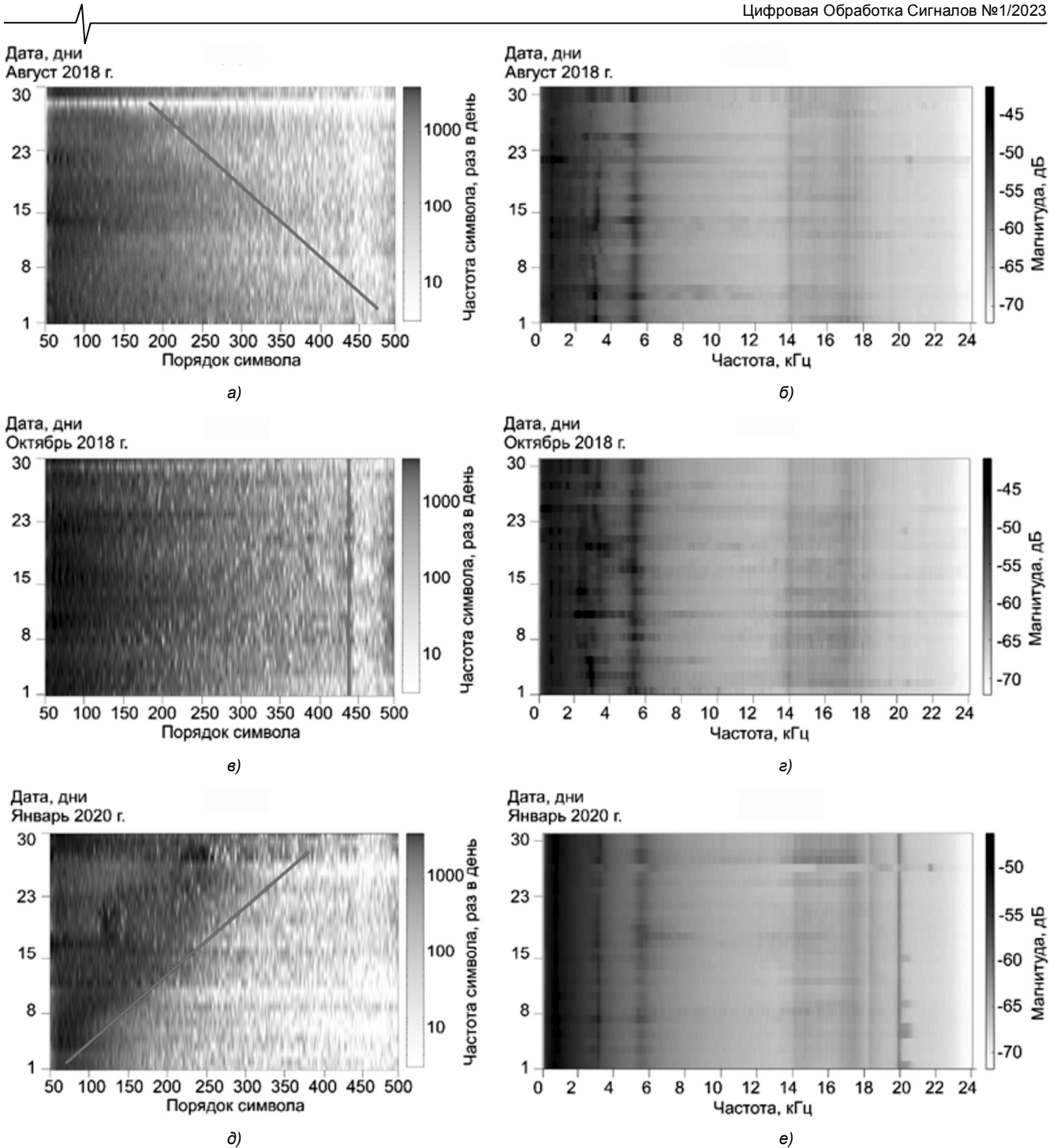


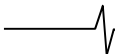
Рис. 10. Некоторые результаты анализа сигналов ГАЭ, зарегистрированных в 2018–2020 гг.:

(а)–(в) – примеры аномалий, (г)–(е) – спектрограммы сигналов

Предлагаемая авторами методика была применена к алфавитам сигналов ГАЭ, зарегистрированных в 2018 – 2020 гг. С помощью трехмерных графиков были выявлены разнообразные аномалии, выражающиеся в изменениях тональности и формы изображений. Примеры таких аномалий показаны на рис. 10 а-в. Серыми линиями отмечены их формы. На рис. 10 г-е изображены спектрограммы тех же сигналов. Спектрограммы менее информативны на выбранном временном масштабе (1 сутки). Заметные на них вертикальные полосы (например, в окрестностях 3 кГц, 5 кГц, 18 кГц или 20 кГц) возникают из-за особенностей приемного тракта.

Заключение

В результате выполненного исследования было проведено стохастическое моделирование импульсного сигнала геоакустической эмиссии, регистрируемого точечным приемником в условиях однородной и изотропной среды. В качестве параметров модели рассматриваются амплитуда и длительность импульсов, а также межимпульсный интервал. Разработана методика трехмерного представления динамики этих параметров, позволяющая выделять особенности их поведения во времени. Проведена апробация данной методики на искусственном сигнале с различными функциями распре-



ления параметров потока импульсов. В результате применения разработанной авторами методики к сигналу ГАЭ, зарегистрированному в пункте наблюдений «Карымшина», были выявлены аномалии в распределении параметров импульсного потока ГАЭ. В сравнении с классическим методом спектрограмм предлагаемая авторами методика более чувствительна к изменениям параметров потока импульсов ГАЭ, и, следовательно, лучше подходит для поиска аномалий.

Литература

1. Gusman A. R., Roger J., Power W. et al. The 2021 Loyalty Islands earthquake (Mw 7.7): Tsunami waveform inversion and implications for tsunami forecasting for New Zealand. *Earth and Space Science*. 2022, vol. 9, no. 11. 22 p.
2. Kaistrenko V. Tsunami Recurrence and Hazard Evaluation for the South Kuril Islands. *Pure and Applied Geophysics*. 2022. 20 p.
3. León T., Lau A.Y.A., Easton G. et al. A comprehensive review of tsunami and palaeotsunami research in Chile. *Earth-Science Reviews*. 2022, vol. 236, no. 3. art. no. 104273.
4. Sivakumar R., Ghosh S. Assessment of the influence of physical and seismotectonic parameters on landslide occurrence: an integrated geoinformatic approach. *Natural Hazards*. 2021, vol. 108, no. 3, pp. 2765-2811.
5. Chamoli B., Kumar A., Chen D. et al. A Prototype Earthquake Early Warning System for Northern India. *Journal of Earthquake Engineering*. 2021, no. 25, pp. 2455–2473.
6. Tripodi V., Gervasi A., La Rocca M. et al. Seismotectonics of Southern Calabria Terrane (South Italy). *Journal of Mountain Science*. 2022, no. 19, pp. 3148-3162.
7. Магомедов Р.А., Мусаев М.А. Оценка сейсмотектонического потенциала блоков Восточного Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2021. Т. 11, № 4. С. 43-57.
8. Владимирова И.С., Лобковский Л.И., Алексеев Д.А. и др. Особенности сейсмического процесса в западной части Алеутской субдукционной зоны и их возможная связь с климатическими изменениями в Арктике. *Арктика: экология и экономика*. 2022. Т. 12, № 1. С. 58-67.
9. Marapulets Y., Rulenko O. Joint Anomalies of High-Frequency Geoacoustic Emission and Atmospheric Electric Field by the Ground–Atmosphere Boundary in a Seismically Active Region (Kamchatka). *Atmosphere*. 2019, no. 10, art. no. 267. 16 p.
10. 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.
11. Купцов А.В., Ларионов И.А., Шевцов Б.М. Особенности геоакустической эмиссии при подготовке камчатских землетрясений. *Вулканология и сейсмология*. 2005. № 5. С. 45–59.
12. Гордиенко В.А., Гордиенко Т.В., Краснописцев Н.В. и др. Аномалия высокочастотных сигналов геоакустической эмиссии как оперативный предвестник землетрясения. *Акустический журнал*. 2008. Т. 54, № 1. С. 97-109.
13. Александров Д.В., Дубров М.Н., Ларионов И.А. и др. Сейсмо-деформационный и акустический мониторинг геодинамических процессов высокочувствительными пространственно разнесенными приборами в сейсмоэнергoактивной и асейсмической зонах. *Вулканология и сейсмология*. 2019. № 3. С. 72–80.
14. Малкин Е.И., Луковенкова О.О., Солодчук А.А. и др. Предсейсмические эффекты в сигналах геоакустической и электромагнитной эмиссии по данным наблюдений на Камчатке в 2013 году. *Теория и практика современных гуманитарных и естественных наук. Выпуск 10: сборник научных статей ежегодной межрегиональной научно-практической конференции, Петропавловск-Камчатский, 10-14 февраля 2020 г. / отв. ред. М.А. Фризен, Р.И. Паровик; КамГУ им. Витуса Беринга*. 2020. С. 130-133.
15. Lukovenkova O., Marapulets Y., Solodchuk A. Adaptive Approach to Time-Frequency Analysis of AE Signals of Rocks. *Sensors*. 2022, vol. 24, art. no. 9798.
16. Нестеров С.В., Акуленко Л.Д., Гавриков А.А. Определение динамической плотности гранулированной среды, пропитанной жидкостью. *ДАН*. 2011. Т. 436, № 6. С. 760-763.
17. Горная энциклопедия. Акустические свойства горных пород. URL: www.miningenc.ru/a/akusticheskie-svoystva (дата обращения 29.11.2022).
18. Хмелевской В.К. Геофизические методы исследования земной коры. Часть 1. URL: www.astronet.ru/db/msg/1173309/ (дата обращения 29.11.2022).
19. Березин Ю.А., Сподарева Л.А. Распространение акустических сигналов в грунтах. *Прикладная механика и техническая физика*. 2001. Т. 42, № 4. С. 177-183.
20. Кан Ш.Ч, Микулович А.В., Микулович В.И. Анализ нестационарных сигналов на основе преобразования Гильберта – Хуанга. *Информатика*. 2010. № 2. С. 25-35.
21. Svetlakov M., Kovalev I., Konev A. et al. Representation Learning for EEG-Based Biometrics Using Hilbert-Huang Transform. *Computers*. 2022, vol. 11, no. 3. art. no. 47.
22. Mandrikova O., Mandrikova B. Method of wavelet-decomposition to research cosmic ray variations: Application in space weather. *Symmetry*. 2021, vol. 13, no. 12. art. no. 2313.
23. Сенкевич Ю.И., Марапулец Ю.В., Луковенкова О.О. и др. Методика выделения информативных признаков в сигналах геоакустической эмиссии. *Труды СПИИРАН*. 2019. Т. 18, № 5. С. 1066-1092.