


ФИЗИКА

 <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2023-45-4-109-121>

Научная статья

Полный текст на русском языке

УДК 519.254



Методика оценки состояния приповерхностных осадочных пород по результатам наблюдений динамических характеристик геоакустической эмиссии

*Ю. И. Сенкевич, М. А. Мищенко**

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
684034, Камчатский край, Елизовский район, с. Паратунка, ул. Мирная, 7, Россия

Аннотация. В ИКИР ДВО РАН проводится мониторинг состояния приповерхностных осадочных пород по результатам обработки и анализа сигнала геоакустической эмиссии (ГАЭ). Рассматривается изменение во времени характеристик сигнала ГАЭ, таких как длительность импульсов и разнообразие их амплитудно-фазовой модуляции в скользящем временном окне различной ширины. Ранее была обнаружена связь между степенью напряженно-деформированного состояния осадочных пород и интенсивностью импульсного потока в сигнале геоакустической эмиссии. На данном этапе проведенных исследований представлена вероятностная модель формирования сигнала ГАЭ, которая позволяет описать изменения состояния приповерхностных осадочных пород на основе динамики распределений амплитуды и длительности геоакустических импульсов. Таким образом, изменение динамических характеристик сигнала ГАЭ можно рассматривать в качестве индикатора активизации деформационных процессов в пункте наблюдений. Представление характеристик сигнала ГАЭ в виде трехмерных изображений статистических распределений амплитуды и длительности импульсов, размещаемых на графике через установленные временные интервалы, позволяет выделять аномальные участки сигнала и проводить их классификацию. Конечной целью проводимых исследований является разработка методов анализа наблюдаемых аномалий характеристик сигнала ГАЭ в интересах обнаружения их связи с вероятностью возникновения землетрясений. В перспективе это позволит осуществлять привязку обнаруживаемых аномалий с определенными сейсмическими событиями, а также отличать их от аномалий, возникающих под воздействием климатических и сезонных факторов.

Ключевые слова: мониторинг состояния, приповерхностные породы, динамические характеристики, геоакустическая эмиссия.

Получение: 02.11.2023; Исправление: 04.12.2023; Принятие: 05.12.2023; Публикация онлайн: 15.12.2023

Для цитирования. Сенкевич Ю.И., Мищенко М.А. Методика оценки состояния приповерхностных осадочных пород по результатам наблюдений динамических характеристик геоакустической эмиссии // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2023. Т. 45. № 4. С. 109-121. EDN: UMHNFL. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2023-45-4-109-121>.

Финансирование. Работа выполнена в рамках реализации государственного задания № АААА-А21-121011290003-0
Конкурирующие интересы. Конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

*Корреспонденция: ✉ E-mail: micle@ikir.ru


Контент публикуется на условиях Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Сенкевич Ю. И., Мищенко М. А., 2023

© ИКИР ДВО РАН, 2023 (оригинал-макет, дизайн, составление)



PHYSICS

 <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2023-45-4-109-121>

Research Article

Full text in Russian

MSC 94A12



Method for Estimation of Near-Surface Sedimentary Rock State Based on the Results of Observations of Geoacoustic Emission Dynamic Characteristics

*Yu. I. Senkevich, M. A. Mishchenko**

Institute for Cosmophysical Research and Radio Propagation FEB RAS, 684034, v. Paratunka, Mirnaya st., 7, Russia

Abstract. The technology of observations of the near-surface sedimentary rock state is developed and realized in IKIR FEB RAS since 2003. It is based on the results of geoacoustic emission signal processing and analysis. The relation between the degree of stress-strain state of sedimentary rocks and pulse flux intensity in geoacoustic emission signal has been discovered before. Continuous measurements of geoacoustic emission pulse flux intensity, pulse form and their distributions are carried out. The final aim of the investigations is the development of methods for analysis of the observed anomalies of geoacoustic emission signal characteristics to detect their relation with the probability of earthquake occurrences. At the current stage of the research, a probabilistic model of GAE signal formation in the near-surface sedimentary rocks at the reception site is presented. The model makes it possible to describe the changes in the near-surface sedimentary rocks state based on the results of estimations of the changeability of pulse duration distribution pattern and that of their amplitudes taking into account the update of the model for signal formation at the receiving device input. The results of computational experiments with natural signals of geoacoustic emission, confirming the changes made in the model of GAE signal formation. Implementation of the research results into the observation practice makes it possible to improve the quality of real-time observations of the changes in the near-surface sedimentary rock state without expensive and laborious methods of direct measurements. Time changes in the following characteristics of GAE are considered: changes in pulse duration and diversity of their amplitude-phase modulation in a moving time window of different duration. The result is achieved by visual representation of GAE signal characteristics in the form of three-dimensional images of statistical distributions of pulse duration and amplitudes mapped on a graph at defined time intervals. Such a representation allows one to see the occurring anomalies in GAE signal characteristics parameters and to classify the observed anomalies. In the future, that will allow to connect the detected anomalies with certain seismic events and to distinguish them from the anomalies occurring under climatic and seasonal factors impact.

Key words: condition monitoring, near-surface rocks, dynamic characteristics, geoacoustic emission.

Received: 02.11.2023; Revised: 04.12.2023; Accepted: 05.12.2023; First online: 15.12.2023

For citation. Senkevich Yu. I., Mishchenko M. A. Method for estimation of near-surface sedimentary rock state based on the results of observations of geoacoustic emission dynamic characteristics. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2023, 45: 4, 109-121. EDN: UMHNFL. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2023-45-4-109-121>.

Funding. The research was carried out in the framework of realization of the State Task AAAA-A21-121011290003-0

Competing interests. There are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.

*Correspondence:  E-mail: micle@ikir.ru

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Senkevich Yu. I., Mishchenko M. A., 2023

© Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, 2023 (original layout, design, compilation)



Введение

Лаборатория акустических исследований ИКИР ДВО РАН с 2003 года проводит работы по изучению акустических, электростатических и электромагнитных полей верхнего слоя земной коры на разных этапах подготовки камчатских землетрясений [1, 2]. Неотъемлемой частью исследований является использование оригинальных методов и алгоритмов выделения информативных признаков опасных сейсмических событий [3–6]. С 2016 года по настоящее время в лаборатории накоплен и постоянно пополняется непрерывный ряд широкополосных геофизических сигналов со стационарного пункта наблюдений. По результатам обработки сигналов осуществляется мониторинг состояния приповерхностных осадочных пород в пункте Карымшина на Камчатке. Комплексный анализ регистрируемых сигналов позволяет проводить вероятностные оценки протекания сложных геофизических процессов, таких как степень напряженно-деформированного состояния верхних слоев литосферы, интенсивность сейсмических волн, которые во многом определяют вероятность возникновения землетрясений и цунами [7, 8].

Отличительной чертой представленной работы является то, что авторы проводят опосредованные наблюдения, среди которых особый интерес с позиции получения информативных признаков представляют методы наблюдения динамических характеристик сигналов высокочастотной геоакустической эмиссии (ГАЭ). Сигналы ГАЭ формируются процессами пластической деформации и представляют поток импульсов с различной амплитудно-фазовой модуляцией, скважностью и длительностью [9]. Таким образом, изменение динамических характеристик сигналов ГАЭ рассматривается в качестве индикатора активизации деформационных процессов в пункте наблюдений. Полученные материалы теоретического моделирования и практический опыт многолетних наблюдений за динамикой характеристик ГАЭ [1, 10, 11] указывают на их возможную связь с локальными сейсмическими событиями.

Целью настоящего исследования является развитие авторских методов обработки сигналов ГАЭ для анализа динамики состояния приповерхностных осадочных пород. Представлены результаты вычислительных экспериментов с естественными сигналами ГАЭ. Внедрение результатов исследования в практику наблюдений позволяет повысить качество оперативного наблюдения за скоростью и характером смены состояния приповерхностных осадочных пород, не прибегая к затратным и трудоемким абсолютным методам прямых измерений и анализа данных. Рассматриваются изменения во времени следующих характеристик ГАЭ: изменение длительности импульсов и разнообразие их амплитудно-фазовой модуляции в скользящем временном окне различной длительности.

Основная часть

Для лучшего понимания сущности проводимых исследований выполним серию математических преобразований, описывающих поведение импульсных потоков в пункте приема сигнала ГАЭ. Импульсный поток ГАЭ формируется из суммы независимых источников отдельных импульсов в полусфере, находящейся на расстоянии R от акустического приемника со сферической характеристикой направленности приема, находящегося вблизи поверхности раздела сред литосфера-атмосфера (рис. 1).



Рис. 1. Схема приёма сигнала геоакустической эмиссии в пункте наблюдений
[Figure 1. Scheme for receiving a geoaoustic emission signal at an observation point]

Радиус R определяется порогом чувствительности приемной аппаратуры Π_0 . Для простоты дальнейших выводов положим, что все источники импульсов ГАЭ одинаковы по своим параметрам. Генерируемые ими акустические волны в пределах полусферы приема распространяются в однородной и изотропной среде. Амплитуда импульсов A , коэффициент затухания акустических волн δ . Тогда для источника импульса, лежащего на поверхности полусферы приема, справедливо равенство (1):

$$A/(\delta R^2) = \Pi_0. \quad (1)$$

Откуда получаем значение радиуса полусферы приема:

$$R = \sqrt{\frac{A}{\delta \Pi_0}}$$

Наблюдаемые на практике сигналы ГАЭ представляют поток релаксационных импульсов. Зная затухание сигнала в осадочных породах (коэффициент затухания в среднем у вулканических, метаморфических и осадочных пород $k=10^{-3}-10^{-2} \text{ м}^{-1}$, у рыхлых осадочных — $k = 10^{-3} - 0,5 \text{ м}^{-1}$) и величину скорости продольных колебаний с частотой f в диапазоне от 20 Гц до 20 кГц равную $c = 0,2-1,8 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$ [12–14], можно определить радиус R полусферы приема сигнала, который составляет от 5 до 15 м. Границы длительности наблюдаемых импульсов лежат в диапазоне от одной тысячной до нескольких десятых секунды.

Это позволяет утверждать, что в результате движение фронта импульса при указанной скорости распространения акустических волн в среде $r(\tau) > R$, возможен одновременный прием сигналов, как от источников в непосредственной близости от акустического датчика приемной аппаратуры, так и от источника, находящегося на поверхности полусферы приема на расстоянии R . Поэтому, считая плотность распределения источников импульсов в среде равномерной - ρ_0 , сигнал ГАЭ будет представлять суперпозицию сигналов от всех рассеянных по объему активных источников импульсов n (2).

$$s(t) = \sum_{i=1}^n p_i \theta_i(t - t_i). \quad (2)$$

Здесь p_i — вероятность активации источника, $\theta_i()$ - функция i -го импульса, t_i - время регистрации активации i -го импульса. Общее число таких источников в объеме полусферы приема с учетом радиуса R из (1) равно (3):

$$n = \rho_0 \frac{2}{3} \pi R^3 = \rho_0 \frac{2}{3} \pi \sqrt[3]{\frac{A}{\delta \Pi_0}} \quad (3)$$

Эти источники (3) составляют основу косвенной индикации внешних факторов, оказывающих влияние на полусферу приема (рис. 1). Из общего числа источников n на каждый момент времени только некоторая часть m из них находится в активном состоянии — состоянии генерации импульса. Представим это число через показатель активности (4):

$$\frac{m}{n} = p(T, P, W, F_s), \quad (4)$$

который может меняться в пределах от 0 до 1. Практика натуральных наблюдений показала, что в условиях стабильных значений температуры - T , атмосферного давления - P и низкой влажности - W вероятность активности (4) стремится к нулю (фоновая активность отсутствует). Изменение перечисленных значений приводит к заметным изменениям показателя активации (4) и его выраженной зависимости от этих значений [1]. Кроме погодных факторов на показатель активности (4) оказывает заметное влияние внешнее воздействие F_s , связанное с деформационным процессом в приповерхностных породах [15]. Таким образом, задача проводимых исследований состояла в поиске вариантов обработки данных, позволяющих наглядно проводить оценку влияния внешнего воздействия F_s , вызывающего изменение состояния приповерхностных осадочных пород.

Для оценки внешнего воздействия F_s важно понять, как формируется сигнал ГАЭ на входе акустического датчика. С этой целью построим простую модель потока импульсов ГАЭ на входе приемной аппаратуры. Упростим представление функции генерации импульсов ГАЭ в среде до классического затухающего гармонического колебания с начальной фазой равной нулю. На основании (2) получим следующее выражение (5):

$$s(t) = \begin{cases} \sum_{i=1}^n p_i \exp(-\delta(\tau - (t - t_i))) \sin(\omega(\tau - (t - t_i))), & 0 \leq (t - t_i) \leq \tau_i \\ 0 & 0 > (t - t_i) > \tau_i, \end{cases} \quad (5)$$

где A — амплитуда, δ — коэффициент затухания, ω — круговая частота модуляции, τ — длительность импульса.

При условии монотонного убывания огибающей сигнала влиянием колебательного процесса (частотной модуляцией) можно пренебречь. Длительность принимаемого i -го импульса τ наблюдается как часть от его истинной длительности, что является эффектом подпорогового маскирования части сигнала, в которой его энергия не превышает значение пороговой чувствительности приемной аппаратуры Π_0 . Этот факт отражает уравнение (6), и наглядно демонстрируется на рис. 2.

$$|A(r_i) \exp(-\delta\tau_i)| = \Pi_0. \quad (6)$$

Откуда выразим явную связь длительности i -го импульса с его амплитудой на входе приемной аппаратуры после прохождения расстояния r_i акустической волной от i -го источника (7):

$$\tau_i = \frac{1}{\delta} \frac{\ln A(r_i)}{\ln \Pi_0}. \quad (7)$$

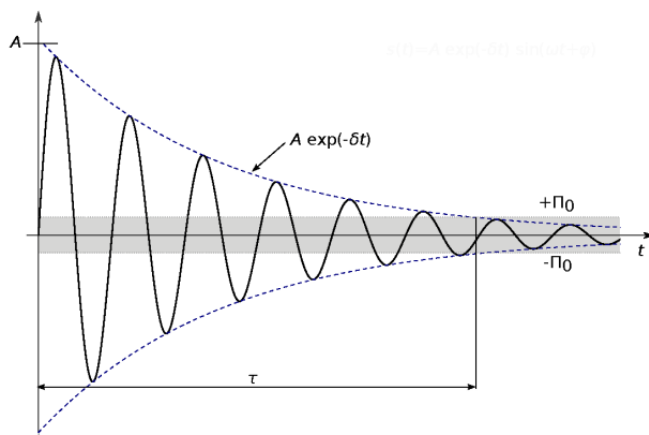


Рис. 2. Аналитическая модель одиночного импульса ГАЭ. Π_0 — порог чувствительности приёмной аппаратуры, τ — длительность импульса
 [Figure 2. Analytical model of a single GAЭ pulse. Π_0 — sensitivity threshold of the receiving equipment, τ — pulse duration]

Энергия затухания сферической волны в ближней зоне распространения обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника $\sim 1/r^2$.

$$e(r) \simeq \frac{A^2}{r^2}, \quad 0 < r \leq R. \quad (8)$$

Это означает, что при постоянной величине порога приемника Π_0 , длительность принимаемых импульсов будет также меняться обратно пропорциональна квадрату расстояния до приемника. С учетом констант (7) можно переписать как:

$$\tau_i = \frac{1}{\delta} \frac{\ln \Pi_0}{\ln(\Pi_0 \delta r^2)} = \frac{1}{\delta} \frac{1}{(1 + \Omega r_i)}. \quad (9)$$

На основании предыдущих выводов представим аналитическое выражение для функции распределения потока ГАЭ по длительности импульсов на входе приемной аппаратуры. Для этого рассмотрим, как меняется число источников импульсов вдоль вектора приема от одной вложенной поверхности полусферы приема до другой с шагом Δr (10).

$$\lim_{\Delta r \rightarrow 0} n(r + \Delta r) = \rho_0 \lim_{\Delta r \rightarrow 0} (v(r) - v(r + \Delta r)), \quad (10)$$

где $v(r) = \frac{2}{3}\pi r^2$ - объем вложенной полусферы радиуса r . В предельном случае $\Delta r \rightarrow 0$ получим функцию распределения числа импульсов вдоль вектора приема f_m (11):

$$f_m(r) = 2\pi\rho_0 r^2, \quad 0 < r \leq R. \quad (11)$$

При условии, что вероятность активации источников при стабильных значениях параметров (4) не меняется, очевиден вывод об обратном степенном законе распределения значений амплитуд импульсов ГАЭ в зависимости от расстояния от источника, поскольку согласно (11) таких источников становится в r^2 больше, а амплитуды импульсов $\sim 1/r^2$ меньше.

Полученные результаты дают представление о функциях распределения по длительности импульсов (9), числу источников излучения (11), а также распределения амплитуд, в зависимости от расстояния до акустического датчика приемной аппаратуры. Полученные зависимости позволяют учитывать функции распределения при обработке сигналов ГАЭ и лучшим образом наблюдать аномальные отклонения распределений, вызванные внешними факторами, используя удаление стандартного фонового распределения рассматриваемых параметров. Данная операция подобна удалению постоянной составляющей из сигнала. Для ее выполнения делается пошаговый расчет распределений с заданным значением временного окна на протяжении выбранного периода наблюдения состояния приповерхностного слоя. Высчитывается среднее значение полученных распределений для длительностей импульсов и амплитуд (12):

$$f_{cp}(\tau) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k f_k(\tau), \quad 0 < \tau \leq \tau_{max} \quad (12)$$

$$f_{cp}(A) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k f_k(A), \quad 0 < A \leq A_{max}$$

и выполняется пересчет соответствующих параметров (13):

$$f'(\tau) = f(\tau) - f_{cp}(\tau), f'(A) = f(A) - f_{cp}(A). \quad (13)$$

На рис. 3а и 4а представлены результаты вычисления функций распределения длительности импульсов и их амплитуды за одни сутки, подтверждающие модельное представление (8) и (10) соответственно.

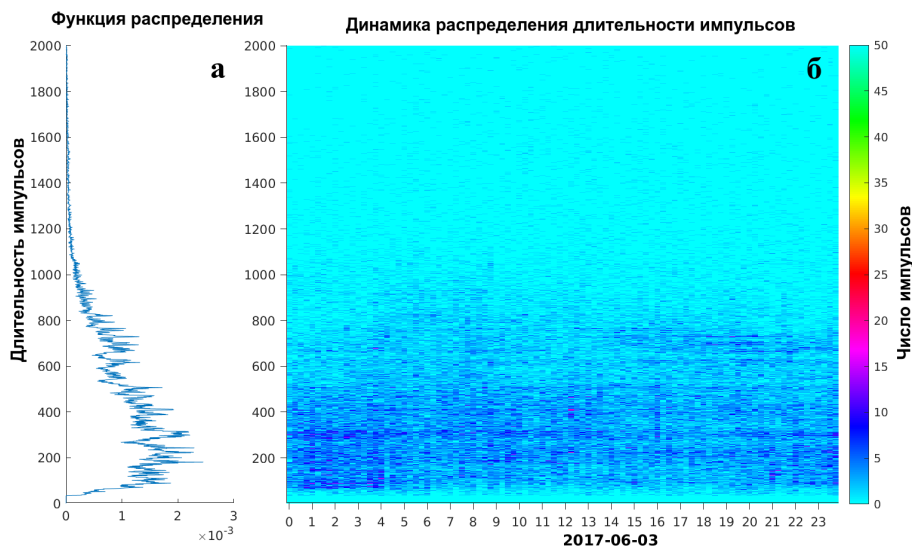


Рис. 3. Статистические параметры, рассчитанные на основе данных о длительности импульсов ГАЭ, зарегистрированных в течении суток (3 декабря 2017). График а – функция распределения длительности импульсов, б – динамика распределения длительности импульсов [Figure 3. Statistical parameters calculated based on data on the duration of GAE pulses recorded during the day (December 3, 2017). Graph a - pulse duration distribution function, b - dynamics of pulse duration distribution]

Для проведения наблюдений за динамикой поведения статистических характеристик сигнала используются цветные карты по типу распределений тепловых полей в физике Земли, где по оси ординат откладывается значение параметра, по оси абсцисс — время, а цветом отображается накапливаемая статистика за один заданный интервал скользящего временного окна. На рис. 3б представлена динамика распределения длительности импульсов с шагом 15 минут, а на рис. 4б представлена динамика распределения амплитуды импульсов с тем же шагом.

Выполняя суммирование результатов выполнения (13) можно построить пороговый обнаружитель аномальных отклонений динамики поведения сигнала ГАЭ в окне определенного масштаба (u, v) , величина которого ориентирована на ожидаемую протяженность аномалии Θ :

$$f'_u(\tau) = \sum_{i=1}^u f_u(\tau) > D_\tau(u), u \sim \Theta_\tau; f'_v(A) = \sum_{i=1}^v f_v(A) > D_A(v), v \sim \Theta_A \quad (14)$$

и выполняется пересчет соответствующих параметров (13):

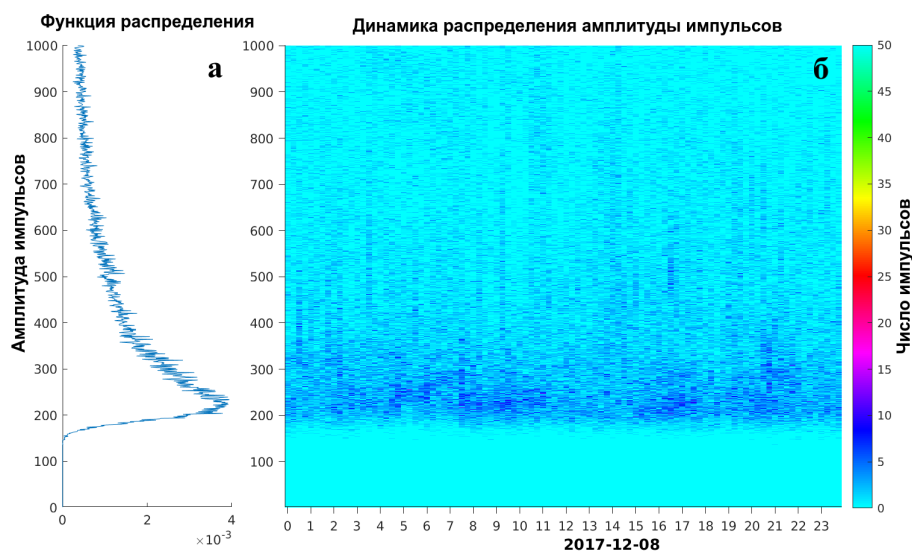


Рис. 4. Статистические параметры, рассчитанные на основе данных об амплитуде импульсов ГАЭ, зарегистрированных в течении суток (8 декабря 2017). График а – функция распределения амплитуды импульсов, б – динамика распределения амплитуды импульсов

[Figure 4. Statistical parameters calculated based on data on the amplitude of GAE pulses recorded during the day (December 8, 2017). Graph a - pulse amplitude distribution function, b - dynamics of pulse amplitude distribution]

Учет фонового распределения параметров сигнала ГАЭ, имитирующего реальные условия его получения в точке установки приемной аппаратуры, путем его удаления из реальных картин динамического распределения импульсов и амплитуд, повышает контрастность наблюдаемых аномалий распределения, возникающих в результате воздействия внешних факторов. Такими факторами являются погодные условия и деформационные процессы, возникающие под воздействием сейсмических явлений. В результате применения такого рода фильтрации в практике измерений удастся значительно повысить качество выделения наблюдаемых аномалий, снизить ошибки классификации аномалий и существенно сократить время вычислений.

Заключение

Представлена вероятностная модель формирования сигнала ГАЭ в приповерхностных осадочных породах в точке приема. Исследование направлено на совершенствование методики наблюдения динамики характеристик геоакустической эмиссии для оценки изменения состояния приповерхностных осадочных пород по результатам вычислений изменчивости картин распределения длительности импульсов и их амплитуд с учетом уточнения модели

формирования сигнала на входе приемного устройства. Показаны результаты вычислительных экспериментов с естественными сигналами геоакустической эмиссии подтверждающие внесенные изменения в модель формирования сигнала ГАЭ. Внедрение результатов исследования в практику наблюдений позволяет повысить качество оперативного наблюдения за сменой состояния приповерхностных осадочных пород, не прибегая к затратным и трудоемким методам прямых измерений. Рассматриваются изменения во времени следующих характеристик ГАЭ: изменение длительности импульсов и разнообразие их амплитудно-фазовой модуляции в скользящем временном окне различной длительности. Это позволяет на уровне изменений характеристик сигнала ГАЭ отличить фоновое воздействие погодных факторов от более продолжительных воздействий деформационных процессов, происходящих под влиянием сейсмотектонического процесса в регионе. В результате учета указанного отличия удастся более детально проводить наблюдения за состоянием приповерхностных осадочных пород по результатам анализа характеристик сигналов ГАЭ. Результат достигается путем наглядного представления характеристик сигналов ГАЭ в виде трехмерных изображений статистических распределений длительности импульсов и их амплитуды, размещаемых на графике через установленные временные интервалы. Выделение влияния на сигнал ГАЭ искомых изменений состояния приповерхностных осадочных пород под действием медленных сейсмических процессов планируется осуществлять в два этапа. На первом этапе вычисляется среднестатистическое распределение выбранного параметра сигнала ГАЭ, рассчитанное на длительном временном масштабе (сутки, неделя, месяц, год), которое интерпретируется как результат среднестатистического искажения полезного сигнала фоновым воздействием погодных факторов. На втором этапе полученное статистическое распределение последовательно вычитается из каждого статистического распределения, полученного в заданном временном окне меньшего масштаба. Причем временное окно выбирается на порядок меньше интервала, за который было вычислено фоновое статистическое распределение параметра. В результате наблюдаемые картины распределения параметров становятся более контрастными, что улучшает возможности анализа динамики характеристик сигналов ГАЭ и позволяет более объективно осуществлять опосредованную оценку состояния приповерхностных осадочных пород в точке приема сигнала.


Список литературы

1. Марапулец Ю.В., Сенкевич Ю.И., Луковенкова О.О., Солодчук А.А., Ларионов И.А., Мищенко М.А., Малкин Е.И., Щербина А.О., Гапеев М.И. *Комплексный анализ акустических и электромагнитных сигналов для оценки уровня сейсмической опасности*. Владивосток: Дальнаука, 2020. 120 с.
2. 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. Физ.-мат. науки*, 2018. Т. 25, № 5, С. 52–63, DOI: 10.18454/2079-6641-2018-25-5-62-73.
3. Senkevich Y. Search for Hidden Patterns in Acoustic and Electromagnetic Pulse Signals, *XXIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM).-IEEE*, 2020 DOI: 10.1109/SCM50615.2020.9198754.


4. Gapeev M., Marapulets Yu. Modeling Locations with Enhanced Earth's Crust Deformation during Earthquake Preparation near the Kamchatka Peninsula, *Applied Sciences*, 2023. vol. 13, no. 1, pp. 290, DOI: 10.3390/app13010290.
5. Lukovenkova O., Marapulets Yu., Solodchuk A. Adaptive Approach to Time-Frequency Analysis of AE Signals of Rocks, *Sensors*, 2022. Т. 22, С. 9798, DOI: 10.3390/s22249798.
6. Марапулец Ю.В., Луковенкова О.О., Тристанов А.Б., Ким А.А. *Методы регистрации и частотно-временного анализа сигналов геоакустической эмиссии*. Владивосток: Дальнаука, 2017. 75 с.
7. 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 DOI: 10.25283/2223-4594-2022-1-58-67.
8. Гапеев М.И., Марапулец Ю.В. Моделирование зон относительных сдвиговых деформаций перед сильными землетрясениями на Камчатке, произошедшими в период 2018-2021 гг, *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2021. Т. 37, № 4, С. 53–66, DOI: 10.26117/2079-6641-2021-37-4-53-66.
9. Марапулец Ю.В., Шевцов Б.М. *Мезомасштабная акустическая эмиссия*. Владивосток: Дальнаука, 2012. 126 с.
10. Гапеев М.И., Солодчук А.А., Паровик Р.И. Связанные осцилляторы как модель высокочастотной геоакустической эмиссии, *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2022. Т. 40, № 3, С. 88–100, DOI: 10.26117/2079-6641-2022-40-3-88-100.
11. Гапеев М.И. Оценка областей повышенных деформаций, возникающих при подготовке камчатских землетрясений, *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2022. Т. 41, № 4, С. 32–46, DOI: 10.26117/2079-6641-2022-41-4-32-46.
12. Нестеров С.В., Акуленко Л.Д., Гавриков А.А. Определение динамической плотности гранулированной среды, пропитанной жидкостью, *ДАН*, 2011. Т. 436, № 6, С. 760–763.
13. Горная энциклопедия. Акустические свойства горных пород [Электронный ресурс] URL: <https://www.mining-enc.ru/a/akusticheskie-svoystva> (дата обращения: 31.10.2023)
14. Хмелевской В.К. Геофизические методы исследования земной коры [Электронный ресурс] URL: <https://www.astronet.ru/db/msg/1173309/www.astronet.ru/db/msg/1173309/> (дата обращения: 31.10.2023)
15. 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.

Информация об авторах



Сенкевич Юрий Игоревич ✉ – доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Лаборатории акустических исследований, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Паратунка, Россия,  ORCID 0000-0003-0875-6112.



Мищенко Михаил Александрович ✉ – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Лаборатории акустических исследований, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Паратунка, Россия,  ORCID 0000-0003-1958-5830.


References

- [1] Marapulets Yu. V., Senkevich Yu. I., Lukovenkova O. O., Solodchuk A. A., Larionov I. A., Mishchenko M. A., Malkin E. I., Shcherbina A. O., Gapeev M. I. Kompleksnyj analiz akusticheskikh i jelektromagnitnyh signalov dlja ocenki urovnja sejsmicheskoy opasnosti [Complex analysis of acoustic and electromagnetic signals to assess seismic hazard level]. Vladivostok, Dalnauka, 2020, 120 p. (In Russian).
- [2] Muratov P. V., Rulenko O. P., Marapulets Yu. V., Solodchuk A. A. Electrical and acoustic response of the near-surface sedimentary rocks to seismic earthquake waves passing, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*, 2018. vol. 25, no. 5, pp. 52–63, DOI: 10.18454/2079-6641-2018-25-5-62-73.
- [3] Senkevich Y. Search for Hidden Patterns in Acoustic and Electromagnetic Pulse Signals, *XXIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM).-IEEE*, 2020 DOI: 10.1109/SCM50615.2020.9198754.
- [4] Gapeev M., Marapulets Yu. Modeling Locations with Enhanced Earth's Crust Deformation during Earthquake Preparation near the Kamchatka Peninsula, *Applied Sciences*, 2023. vol. 13, no. 1, pp. 290, DOI: 10.3390/app13010290.
- [5] Lukovenkova O., Marapulets Yu., Solodchuk A. Adaptive Approach to Time-Frequency Analysis of AE Signals of Rocks, *Sensors*, 2022. vol. 22, pp. 9798, DOI: 10.3390/s22249798.
- [6] Marapulets Yu. V., Lukovenkova O. O., Tristanov A. B., Kim A. A. Metody registratsii i chastotno-vremennogo analiza signalov geoakusticheskoi emissii [Methods of registration and time-frequency analysis of geoacoustic emission signals]. Vladivostok, Dalnauka, 2017, 75 p. (In Russian).
- [7] Vladimirova, I. S., Lobkovsky, L. I., Alekseev, D. A., Gabsatarov, Y. V. Features of the seismic process in the western part of the Aleutian subduction zone and their possible relationship with climate changes in the Arctic. *Arktika: ekologiya i ekonomika. [Arctic: Ecology and Economy]*, 2022, vol. 12, no. 1, pp. 58–67. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-1-58-67. (In Russian).
- [8] Gapeev M. I., Marapulets Yu. V. Modeling of relative shear deformation zones before strong earthquakes in Kamchatka from 2018–2021, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*, 2021. vol. 37, no. 4, pp. 53–66, DOI: 10.26117/2079-6641-2021-37-4-53-66.
- [9] Marapulets Yu. V., Shevtsov B. M. Mezomasshtabnaya akusticheskaya emissiya [Mesoscale acoustic emission]. Vladivostok, Dalnauka, 2012, 126 p. (In Russian).
- [10] Gapeev M. I., Solodchuk A. A., Parovik R. I. Coupled oscillators as a model of high-frequency geoacoustic emission, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*, 2022. vol. 40, no. 3, pp. 88–100, DOI: 10.26117/2079-6641-2022-40-3-88-100.
- [11] Gapeev M. I. Estimating the increased deformations areas that occur during the preparation of Kamchatka earthquakes, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*, 2022. vol. 41, no. 4, pp. 32–46, DOI: 10.26117/2079-6641-2022-41-4-32-46.
- [12] Nesterov, S. V., Akulenko, L. D., Gavrikov, A. A. Determination of dynamic density of a granulated medium impregnated with a liquid, *Dokl. Phys.*, 2011. vol. 56, no. 2, pp. 126–129 DOI: 10.1134/S1028335811020145.
- [13] Gornaya enciklopediya. Akusticheskie svojstva gornyh porod [Mountain Encyclopedia. Acoustic properties of rocks] URL: <https://www.mining-enc.ru/a/akusticheskie-svojstva> (In Russian).
- [14] Hmelevskoj V. K. Geofizicheskie metody issledovaniya zemnoj kory [Geophysical methods of studying the Earth's crust] URL: <https://www.astronet.ru/db/msg/1173309> (In Russian).


- [15] Senkevich Yu. I., Marapulets Yu. V., Lukovenkova O. O., Solodchuk A. A. Informative Features Selection in Geoacoustic Emission Signals, *SPIIRAS Proceedings*, 2019. vol. 18, no. 5, pp. 1066–1092 DOI: 10.15622/sp.2019.18.5.1066-1092.

Information about authors



Senkevich Yuri Igorevich ✉ – D. Sci. (Tech.), Docent, Leading Researcher, Laboratory of Acoustic Research, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Paratunka, Russia,  ORCID 0000-0003-0875-6112.



Mishchenko Mikhail Aleksandrovich ✉ – PhD (Phys. & Math.), Senior Researcher, Laboratory of Acoustic Research, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Paratunka, Russia,  ORCID 0000-0003-1958-5830.