

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.04

Научная статья

Современные методы обработки и анализа импульсных геофизических сигналов

О. О. Луковенкова, М. А. Мищенко, Ю. И. Сенкевич, А. О. Щербина

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн
ДВО РАН, 684034, п. Паратунка, ул. Мирная, 7, Россия
E-mail: o.o.lukovenkova@yandex.ru

В Институте космофизических исследований и распространения радиоволн выполняются исследования различных физических полей. Часто регистрируемые в ходе таких исследований сигналы имеют импульсную природу, т. е. представляют собой последовательности импульсов. В настоящей работе описаны современные методы цифровой обработки сигналов, применяющиеся для анализа импульсных геофизических сигналов. Для поиска фрагментов сигнала, содержащих аномалии, применяется цифровая фильтрация по семи частотным диапазонам и последующее усреднение на интервалах длительностью 1 с. Для выделения отдельных импульсов в условиях постоянно присутствующего нестационарного шума используется адаптивная пороговая схема. Для шумоподавления и выделения информативной составляющей сигнала применяется вейвлет-обработка. Для анализа частотно-временной структуры импульсов авторы предлагают использовать метод разреженной аппроксимации. Для анализа особенностей формы импульсов используется преобразование импульса в бинарную матрицу, однозначно определяющую форму импульса.

Ключевые слова: импульсные сигналы, обработка сигналов, анализ сигналов.

 DOI: 10.26117/2079-6641-2022-41-4-120-136

Поступила в редакцию: 01.12.2022

В окончательном варианте: 06.12.2022

Для цитирования. Луковенкова О. О., Мищенко М. А., Сенкевич Ю. И., Щербина А. О. Современные методы обработки и анализа импульсных геофизических сигналов // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки.* 2022. Т. 41. № 4. С. 120-136.  DOI: 10.26117/2079-6641-2022-41-4-120-136

Контент публикуется на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

© Луковенкова О. О. и др., 2022

Финансирование. Работа выполнена в рамках реализации государственного задания №АААА-А21-121011290003-0

Введение

В ИКИР ДВО РАН с начала 90-х годов прошлого века проводятся исследования по выявлению предвестников землетрясений с применением различных методов обработки и анализа геофизических сигналов, поступающих от станций наблюдений, развернутых на Камчатке. Одной из основных и до сих пор не решенных задач является автоматизация поиска и оперативного выделения предсейсмических аномалий (изменения амплитуды, частоты следования, частотного состава или формы импульсов). Некоторые из регистрируемых геофизических сигналов, например, сигналы геоакустической эмиссии [1] и электромагнитного ОНЧ-излучения [2], имеют импульсную природу и представляют собой последовательности высокочастотных (до первых десятков килогерц) импульсов различной амплитуды и длительности. Использование статистических, частотно-временных, энергетических и других методов, используемых для решения подобных задач в смежных областях науки, в данном случае осложняется несколькими причинами:

- принимаемые импульсные геофизические сигналы имеют широкий частотный диапазон, поэтому их регистрируют с высокой частотой дискретизации (до 96 кГц), что приводит к огромным объемам регистрируемых данных;
- неоднородность сред распространения приводит к сильному искажению и ослаблению сигналов, что существенно ограничивает возможности методов исследования;
- сигналы сильно зашумлены как природными, так и техногенными помехами, что осложняет анализ внутренней структуры импульсов;
- широкое разнообразие временных форм импульсов осложняет задачу классификации и требует применения адаптирующихся под конкретный сигнал методов анализа.

В статье выполнен обзор методов обработки и анализа, использующихся для решения задачи исследования импульсных геофизических сигналов и выявления их особенностей в периоды подготовки сейсмических событий. Данные методы были апробированы на сигналах геоакустической эмиссии и электромагнитного ОНЧ-излучения [1].

Методы

Процесс обработки и анализа геофизических сигналов можно представить в виде последовательности следующих этапов: предобработка (поиск фрагментов сигналов, содержащих аномалии), обработка (выделение импульсов, шумоподавление) и анализ (частотно-временной анализ, анализ формы).

Поиск фрагментов сигнала, содержащих аномалии

Непрерывная регистрация геофизических сигналов приводит к накоплению большого объема необработанных данных. Часто нет возможности проанализировать непрерывный ряд полученных данных целиком, поэтому требуются методы, позволяющие определить фрагменты ряда, содержащие аномалии и требующие более детального анализа.

В качестве такого метода авторы предлагают использовать цифровую фильтрацию по семи частотным диапазонам: от 0.1 до 10 Гц, от 30 до 60 Гц, от 70 до 200 Гц, от 200 до 600 Гц, от 600 до 2000 Гц, от 2000 до 6500 Гц и более 6500 Гц. Фильтрация осуществляется эллиптическими полосовыми фильтрами. Порядок и другие параметры фильтров подбирались отдельно для каждого частотного диапазона [3]. Сигналы на выходе каждого из семи фильтров усредняются на интервалах длительностью 1 с. Таким образом из одного сигнала с частотой дискретизации от 44.1 до 96 кГц получаем семь сигналов с частотой дискретизации 1 Гц (рис. 1).

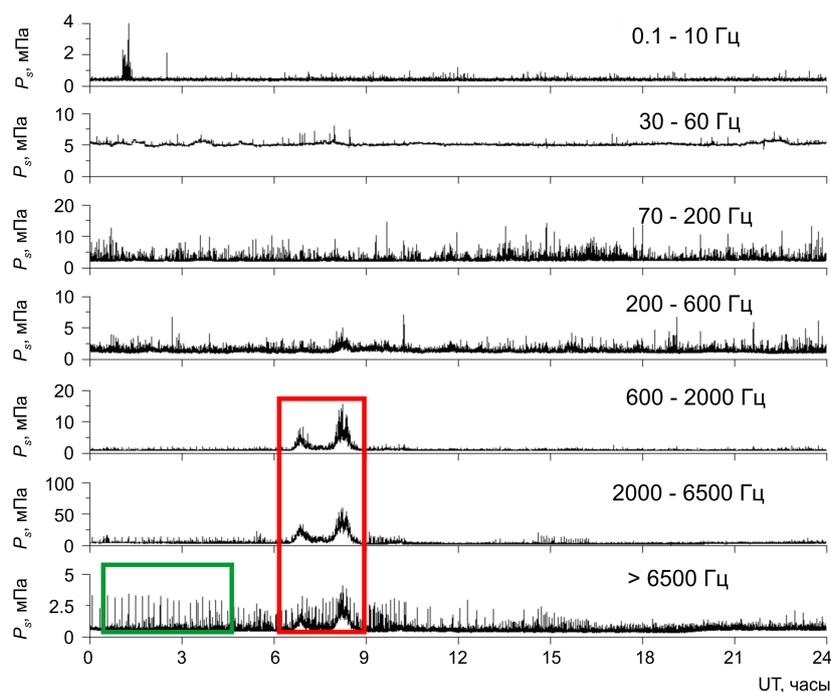


Рис. 1. Пример фильтрации сигнала геоакустической эмиссии по семи частотным диапазонам (запись сигнала от 23 августа 2006 г.). Красной рамкой выделена аномалия в виде увеличения средней амплитуды сигнала. Зеленой рамкой выделена аномалия в виде группы коротких импульсов

[Figure 1. Example of filtering a geoacoustic emission signal within seven frequency bands (the signal recording dated August 23, 2006). The red frame points out an anomaly in the form of average signal amplitude increase. The green frame points out an anomaly in the form of group of short pulses]

В периоды увеличения амплитуды и частоты следования импульсов в накопленных сигналах фиксируются аномалии в виде увеличения средней амплитуды сигнала (на рис. 1 выделена красным цветом), либо в виде групп квазипериодических импульсов короткой длительности (на рис. 1 выделена зеленым цветом).

Выделение импульсов

Далее исследуются различные характеристики отдельных импульсов: полная длительность, длительность переднего и/или заднего фронтов, частота, скважность и т. д. Для этого необходимо максимально точно определять границы импульсов. В простых случаях, например, при отсутствии помех, простой форме импульсов и малом динамическом диапазоне, такие задачи эффективно решаются применением методов сегментации [4, 5, 6], частотно-избирательной фильтрации [7], пороговых схем [8]. Однако процесс выделения импульсов значительно усложняется, если сигналы искажены или зашумлены.

Авторы предлагают адаптивную пороговую схему, предназначенную для выделения фрагментов сигнала, содержащих импульсы, на фоне постоянно присутствующего нестационарного шума. Схема основана на сравнении амплитудно-временных параметров сигнала со значением адаптивного порога. Вычисление порогового значения производится в не пересекающихся окнах фиксированной длины n отсчетов. Текущее значение порога вычисляется относительно математического ожидания и среднеквадратического отклонения предыдущих n отсчетов сигнала

$$S_k = M_{k-1} + B\sigma_{k-1},$$

где S_k — порог, M_{k-1} — математическое ожидание предыдущих n отсчетов, σ_{k-1} — среднеквадратическое отклонение предыдущих n отсчетов, B — экспериментально определяемый параметр.

Для того чтобы обеспечить зависимость порога только от уровня фона, из последовательности n отсчетов исключаются отсчеты, входящие в состав выделенных импульсов. Пример адаптации порога под уровень фонового шума представлен на рис. 2.

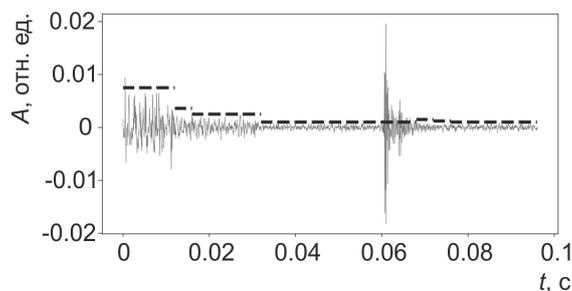


Рис. 2. Пример адаптации пороговой схемы под уровень фонового шума.
[Figure 2. Example of threshold scheme adaptation to background noise level.]

Для исследуемых геофизических сигналов значение параметра n лежит в пределах от 200 до 400 отсчетов. При меньшем значении n увеличивается количество ложных срабатываний детектора (ошибок II рода), при большем — растет число случаев пропуска цели (ошибок I рода). В таблице 1 приведены результаты тестирования адаптивной пороговой схемы на модельном сигнале, содержащем 100 импульсов. Тестирование показало, что наиболее критичная ошибка ложного срабатывания порогового детектора практически исключена.

Таблица 1

Результаты тестирования адаптивной пороговой схемы [Test Results of the Adaptive Threshold Scheme]

Отношение сигнал/шум, SNR (дБ)	Количество выделенных импульсов (шт.)	Ошибки I рода	Ошибки II рода	Количество корректно выделенных импульсов (шт.)
20	100	0	0	100
15	97	3	0	97
10	85	15	0	85
5	65	35	0	65
0	36	64	0	36
-5	0	100	0	0

Шумоподавление

Наиболее распространенными проблемами обработки сигналов являются искажение формы и зашумленность. Эти проблемы характерны для сигналов разных типов: акустических, электрических, электромагнитных и др. На практике на форму сигналов влияют природные шумы, искусственные помехи, нелинейность приемного тракта, ограничения динамического диапазона, ошибки квантования, первичная аппаратная обработка и др. При этом многие перспективные методы анализа (частотно-временные преобразования, разреженная аппроксимация, классификация, кластеризация и т. д.) чувствительны к искажениям формы сигналов, что негативно сказывается на качестве результатов. Если адаптивная пороговая схема для выделения импульсов построена таким образом, что устойчиво работает на сигналах с различным уровнем шума, то методы анализа предполагают применение к неискаженным (или слабо искаженным) импульсам. Поэтому важно устранять шум и искажения формы сигнала перед применением методов анализа.

Одним из популярных методов шумоподавления и выделения информативной составляющей сигнала является вейвлет-фильтрация. Существует большое количество исследований, показывающих эффективность применения вейвлет-преобразования для устранения шумов из сигналов различной природы [9, 10]. Очистка сигнала от шума выполняется в три этапа.

1. *Прямое вейвлет-преобразование.* Предварительно выбирается тип вейвлета и уровень разложения N . В задачах шумоподавления, как правило, применяются ортогональные (вейлеты Добеши, койфлеты, симлеты) и биортогональные семейства вейвлетов. Максимально возможное количество уровней разложения N можно определить по формуле $N = \log_2 L$, где L — длина сигнала.
2. *Пороговая обработка.* Аппроксимирующая составляющая, как правило, содержит низкочастотную информацию (тренд) сигнала, а детализирующие — высокочастотную, поэтому удаление шумов заключается в пороговой обработке детализирующих коэффициентов. Для каждой детализирующей компоненты от 1 до N выбирается порог τ , и по определенному правилу производится модификация детализирующих коэффициентов. Существуют различные стратегии: универсальный порог [11], несмещенная оценка риска Штейна (SURE) [12], блочная оценка Джеймса–Штейна [13], FDR-порог [14], эмпирический метод Байеса [15], принцип минимакса [11] и др.
3. *Обратное вейвлет-преобразование.* После пороговой обработки детализирующих коэффициентов уровней от 1 до N сигнал восстанавливается обратным дискретным вейвлет-преобразованием.

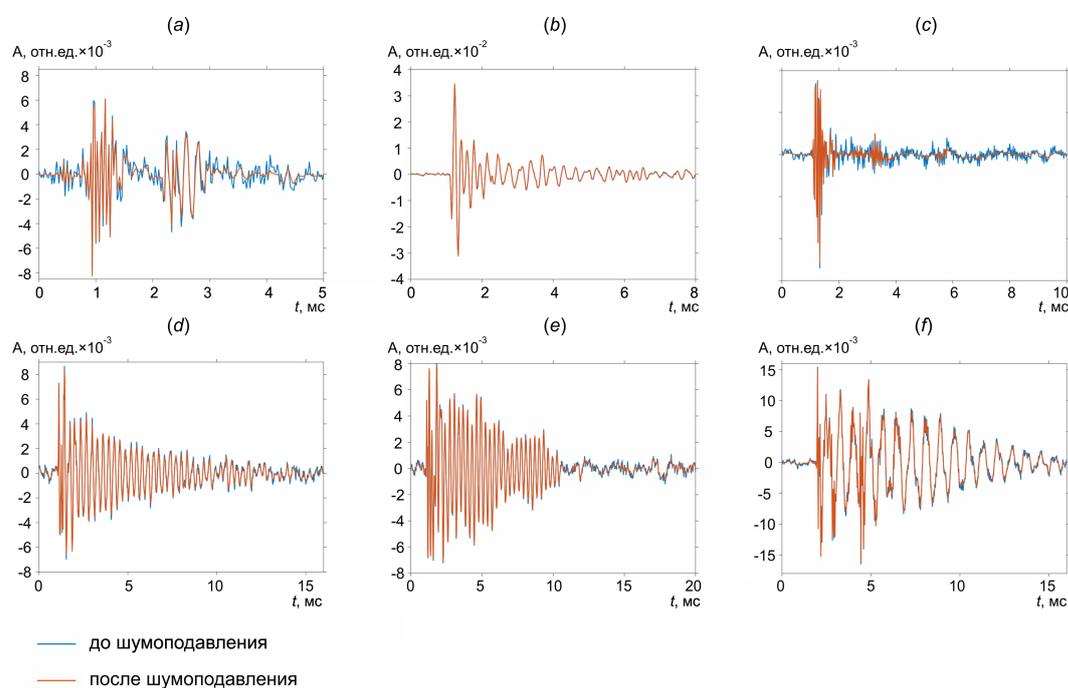


Рис. 3. Результаты применения эмпирического метода Байеса к нескольким импульсам, выделенным из сигналов геоакустической эмиссии
 [Figure 3. Results of application of Empirical Bayes method to several pulses which were isolated from geoaoustic emission signals]

Фоновый шум импульсных геофизических сигналов часто похож на квантованный белый шум [16]. Поэтому в качестве основного метода восстановления и очистки от шумов была выбрана пороговая вейвлет-обработка эмпирическим методом Байеса (вейвлет-коэффициенты оцениваются значением апостериорного математического ожидания, достигается максимальный уровень разложения), предполагающая подавление именно белого шума. В качестве базиса было выбрано семейство симлетов четвертого порядка, однако также возможно использование вейвлетов Добеши и койфлетов [16].

На рис. 3 изображены результаты обработки геоакустических импульсов различной формы. Импульсы были выделены из сигналов, зарегистрированных в январе 2017 г. Обработанные с помощью вейвлетов импульсные сигналы сглажены и очищены от шумов, осложняющих их анализ. При этом степень очистки зависит от уровня шума, например, на рис. 3а,с приведены результаты обработки сильно искаженных импульсов, на рис. 3б — неискаженного импульса, на рис. 3д–ф — импульсов со средним уровнем шума.

Частотно-временной анализ

Для анализа частотно-временной структуры импульсов геофизических сигналов авторы предлагают использовать метод разреженной аппроксимации. Его главная идея — представление сигнала в виде конечной линейной комбинации элементарных функций, выбранных из некоторого большого, в общем случае линейно зависимого набора функций. Отличие от простой аппроксимации состоит в том, что в разложение включаются не все функции, а лишь некоторые, т. е. вектор коэффициентов разложения содержит большое количество нулевых коэффициентов.

$$\begin{cases} x(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \alpha_i g_i(t) \\ \|\alpha\|_0 \rightarrow \min \end{cases}, \quad (1)$$

где $x(t)$ — сигнал, $g_i(t)$ — функции, на которые раскладывается сигнал, α_i — коэффициенты разложения, N — количество функций, на которые раскладывается сигнал $x(t)$, $\|\alpha\|_0 = \#\{i: \alpha_i \neq 0, i = 0 \dots N-1\}$ — l_0 -псевдонорма, равная числу ненулевых элементов вектора.

В [17] указано, что разреженная аппроксимация лучше подходит для анализа нестационарных сигналов, чем классические методы обработки, такие как оконное преобразование Фурье или вейвлет-преобразование. Для примера на рис. 4 приведена оценка структуры модельного импульса со следующими характеристиками: частота дискретизации — 48 кГц, длительность — 3 мс, состоит из трех импульсов с частотами 5, 8, 8.5 кГц (рис. 4а). Оценка спектральной плотности мощности позволяет выявить только две частоты из трех (рис. 4б). На спектрограмме (рис. 4с) и скейлограмме (рис. 4д) сигнала три частоты сливаются в одну структуру. Использование же разреженной аппроксимации (рис. 4е) позволяет выделить в сигнале все три частоты.

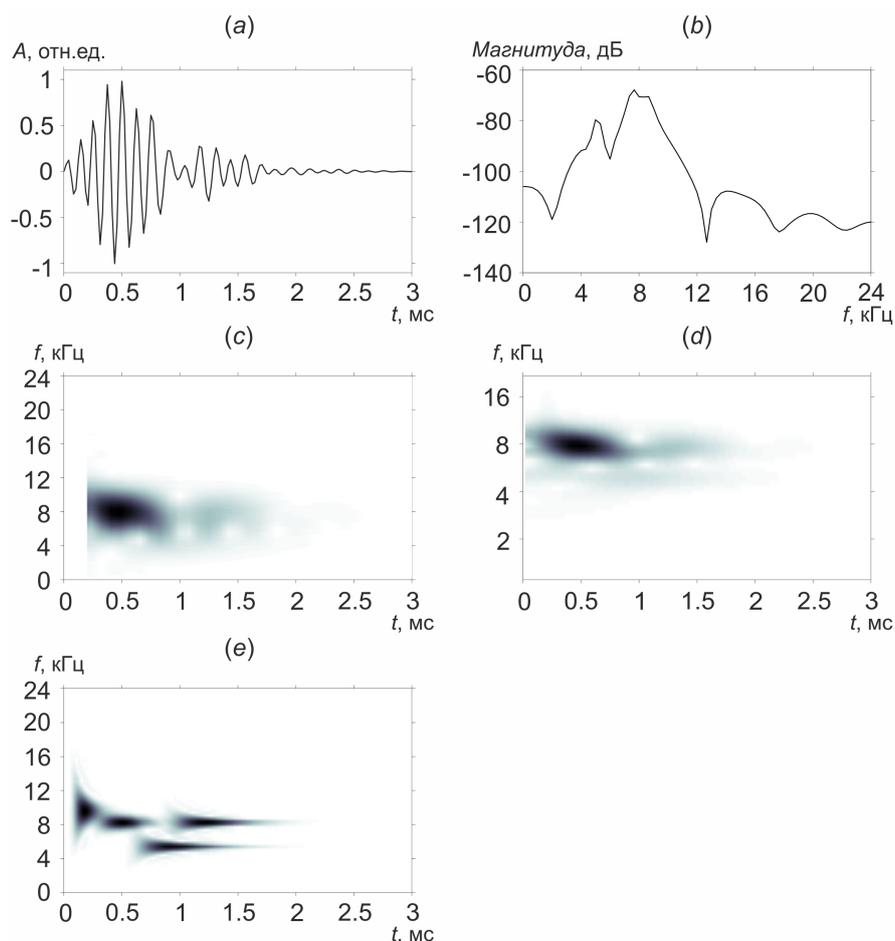


Рис. 4. Сравнение различных методов частотного и частотно-временного анализа: (a) — сигнал, (b) — оценка спектральной плотности мощности методом БПФ (c) — оконное преобразование Фурье, (d) — вейвлет-преобразование (симлеты четвертого порядка), (e) — разреженная аппроксимация (адаптивное согласованное преследование).

[Figure 4. Comparison of various methods of frequency and time-frequency analysis: (a) — signal, (b) — power spectral density estimation using FFT, (c) — Short-time Fourier transform, (d) — wavelet-transform (fourth order symlets), (e) — sparse approximation (Adaptive Matching Pursuit).]

Задача поиска точного решения системы (1) является NP-трудной. Однако существуют методы, позволяющие получить оценку точного решения с некоторой погрешностью за полиномиальное время. Одним из таких методов является метод согласованного преследования, заменяющий минимизацию l_0 -псевдонормы ее ограничением сверху. Главным недостатком данного метода является его высокая вычислительная сложность $O(N^2 \log N)$. Авторы предлагают модифицированную версию метода, адаптивное согласованное преследование, позволяющую получать решения той же точности на наборах функций меньшего размера [1].

Выбор набора функций $g_i(t)$ существенно влияет на качество аппроксимации. Поэтому при выборе функций необходимым условием является соответствие их

форм реальным сигналам. Для разреженной аппроксимации сигналов геоакустической эмиссии и электромагнитного ОНЧ-излучения использовались функции Гаусса [1]

$$g(t) = \exp(-Bt^2) \cos(\omega t), \quad -\infty < t < +\infty$$

и Берлаге

$$g(t) = t^n \exp(-Bt) \sin(\omega t), \quad 0 \leq t < +\infty.$$

Для визуализации разреженных представлений было выбрано преобразование Вигнера—Вилля

$$P_g(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} g\left(\tau + \frac{t}{2}\right) g^*\left(\tau - \frac{t}{2}\right) \exp(-j\omega t) dt. \quad (2)$$

Поскольку преобразование нелинейно и строится на основе квадратичной функции от исходного сигнала, то для аддитивных сигналов в отображении проявляется сильная интерференционная компонента. Поэтому было решено вычислять преобразования Вигнера-Вилля отдельно для каждой функции, входящей в состав сигнала, и накладывать их отображения на частотно-временной плоскости друг на друга. На рис. 5 представлены примеры разреженных представлений импульсов, полученные методом адаптивного согласованного преследования.

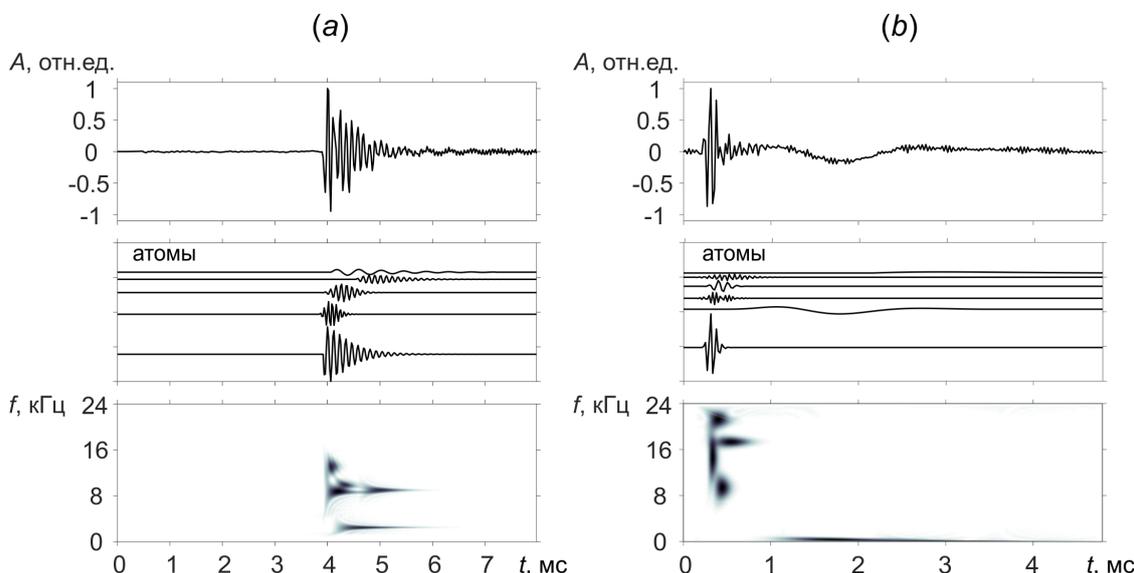


Рис. 5. Примеры разреженных представлений двух импульсов: (а) — импульс геоакустической эмиссии, (б) — импульс электромагнитного ОНЧ-излучения [Figure 5. Examples of sparse representations of two pulses: (a) — a pulse of geoaoustic emission, (b) — a pulse of electromagnetic VLF-radiation]

Анализ формы

Для классификации форм импульсов геофизических сигналов авторы предлагают использовать когнитивные технологии [1]. Импульсы представляются через их особые точки — локальные экстремумы. При этом численные значения функции сигнала в особых точках не играют определяющей роли. В большей степени для распознавания формы импульса имеет значение взаимное расположение этих точек.

На первом этапе импульс преобразуется в последовательности амплитуд локальных экстремумов $\{a_i\} = a_0, a_1, \dots, a_N$ и длительностей временных интервалов между соседними экстремумами $\{\tau_i\} = \tau_0, \tau_1, \dots, \tau_{N-1}$. Далее для каждого импульса составляется бинарная матрица следующего вида

$$D = \begin{pmatrix} r_{0,1} & r_{0,2} & \dots & r_{0,N-1} & r_{0,N} \\ \omega_{0,1} & r_{1,2} & \dots & r_{1,N-1} & r_{1,N} \\ \omega_{0,2} & \omega_{1,2} & \dots & r_{2,N-1} & r_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \omega_{0,N-2} & \omega_{1,N-2} & \dots & r_{N-2,N-1} & r_{N-2,N} \\ \omega_{0,N-1} & \omega_{1,N-1} & \dots & \omega_{N-2,N-1} & r_{N-1,N} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где $r_{i,j}$ — результат сравнения i -й и j -й амплитуд экстремумов; $\tau_{i,j}$ — результат сравнения i -го и j -го интервалов между экстремумами

$$r_{i,j} = \begin{cases} 1, & a_i > a_j \\ 0, & a_i \leq a_j \end{cases}, \quad \omega_{i,j} = \begin{cases} 1, & \tau_i > \tau_j \\ 0, & \tau_i \leq \tau_j \end{cases}. \quad (4)$$

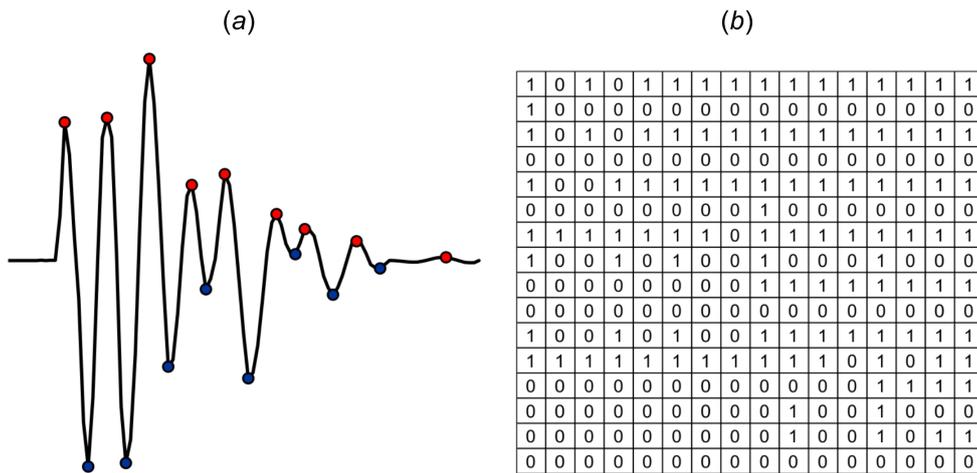


Рис. 6. Пример описания формы импульса матрицей специального вида: (a) — импульс, (b) — описывающая его бинарная матрица

[Figure 6. Example of describing a pulse using the special matrix: (a) — a pulse, (b) — a binary matrix describing the pulse]

На рис. 6 приведены график импульса и построенная для него бинарная матрица. Построенные таким образом матрицы однозначно определяют форму импульса и инвариантны по отношению к операциям сжатия-растяжения по амплитуде или по времени.

Классификация импульсов сводится к определению степени совпадения бинарных матриц. Пусть имеется два импульса, описываемых матрицами D_1 и D_2 разного порядка N_1 и N_2 , $N_1 < N_2$. Можно считать их сравнимыми, если $N_1/N_2 \geq S_0$, $0 < S_0 \leq 1$. Для корректного сравнения матрицы D_1 и D_2 совмещаются таким образом, чтобы последние N элементов, $N = S_0 \cdot N_2$, главной диагонали D_2 накладывались на первые N элементов главной диагонали D_1 , после чего производится подсчет коэффициента сходства, равного отношению количества совпадающих элементов в ограниченной пересечением области к N^2 (общее количество элементов в ограниченной пересечением области).

$$G(D_1, D_2) = \frac{\#(d_1^{i,j} = d_2^{i,j})}{N^2}. \tag{5}$$

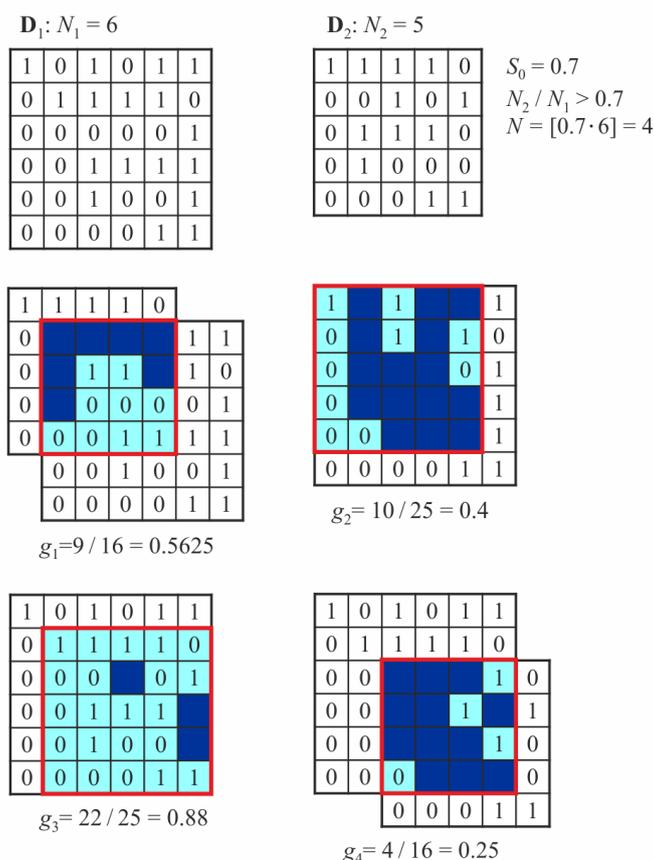


Рис. 7. Иллюстрация процесса сравнения двух матриц с разными значениями порядков

[Figure 7. Illustration of comparing of two matrices of different orders]

Дальнейшие сравнения элементов осуществляются после смещения D_2 вдоль главной диагонали D_1 . Коэффициент сходства вычисляется для каждого последовательного смещения до тех пор, пока матрицы в ограниченной пересечением области имеют порядок не менее N (рис. 7). Итогом сравнения является максимальное значение коэффициента сходства G_{\max} . Если $G_{\max} \geq G_0$ считается, что матрицы принадлежат одному и тому же классу.

Следует отметить, что предлагаемый алгоритм классификации нелинейно чувствителен к выбору пороговых коэффициентов S_0 , G_0 : уменьшение значения S_0 приводит к перераспределению импульсов по классам с большими порядками матриц, а уменьшение значения G_0 позволяет уплотнить классы. Рекомендуемые значения порогов S_0 от 0.6 до 0.9 и G_0 от 0.7 до 0.9.

На рис. 8 приведен пример классификации импульсов модельного сигнала с наложенным белым шумом.

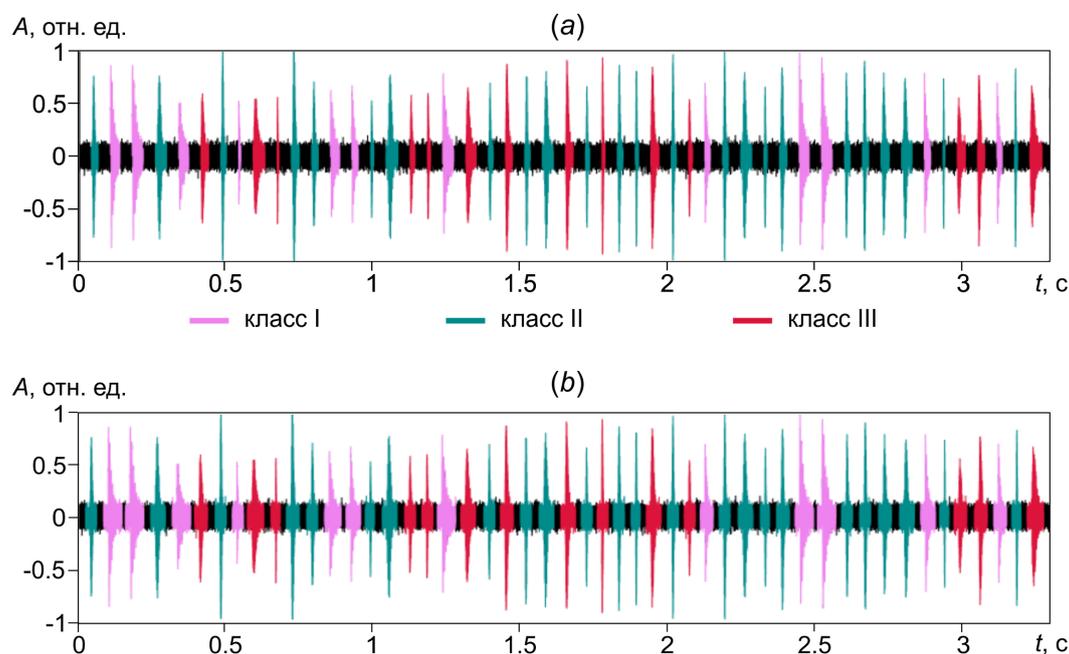


Рис. 8. Результаты анализа модельного сигнала: (а) — сигнал с наложенным белым шумом ($\text{SNR} = 8.9$ дБ), цветами обозначены импульсы со схожей формой, (б) — результаты анализа ($S_0 = 0.6$, $G_0 = 0.7$), выделено три класса импульсов

[Figure 8. Results of analysis of a model signal: (a) — a signal with white noise ($\text{SNR} = 8.9$ dB), colours indicate the pulses of similar shapes, (b) — results of analysis ($S_0 = 0.6$, $G_0 = 0.7$), three classes of pulses were detected]

Заключение

В статье рассмотрены современные методы обработки и анализа импульсных геофизических сигналов. Авторы осветили широкий спектр решаемых задач, среди которых можно выделить: поиск аномальных фрагментов сигнала; определение

границ импульсов; шумоподавление и выделение информативной составляющей сигнала; анализ частотно-временной структуры импульсов; классификация формы импульсов.

Для поиска фрагментов сигнала, содержащих аномалии, предложен метод цифровой фильтрации в различных частотных диапазонах. Такой подход позволяет в оперативном режиме выявлять фрагменты суточных данных, содержащие явные аномалии и требующие дальнейшего анализа. Для выделения импульсов из геофизических сигналов использована адаптивная пороговая схема, подстраивающаяся под постоянно меняющийся уровень фонового шума. Для шумоподавления и восстановления формы отдельных импульсов предложен эмпирический метод Байеса пороговой вейвлет-обработки. Для анализа частотно-временной структуры импульсов предложен алгоритм адаптивного согласованного преследования, показывающий лучшие по сравнению с классическими частотно-временными методами результаты. Для классификации формы импульсов предложен когнитивный метод, заключающийся в преобразовании импульсов в бинарные матрицы, построенные на основе анализа взаимного расположения локальных экстремумов сигнала.

В статье приведены примеры апробации данных методов на сигналах геоакустической эмиссии и электромагнитного ОНЧ-излучения. Авторы считают, что область применения предложенных методов с успехом можно расширить на другие сигналы импульсной природы.

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.

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. Druzhin G. I., Bashkuev Yu. B., Naguslaeva I. B., Cherneva N. V., Shevtsov B. M. Lightning according to electromagnetic field observations in Buryatiya / *Proceedings, 22nd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics* (Tomsk, Russian Federation, November 29, 2016), 10035, 2016 DOI: 10.1117/12.2247926.
3. Марапулец Ю. В., Шевцов Б. М. *Мезомасштабная акустическая эмиссия*. Владивосток: Дальнаука, 2012. 126 с.
4. Fu K. S., Mui J. K. A survey on image segmentation, *Pattern Recognition*, 1981. vol. 13, no. 1, pp. 3–16 DOI: 10.1016/0031-3203(81)90028-5.
5. Frucci M., Sanniti G., Sanniti di Baja G. From Segmentation to Binarization of Gray-Level Images, *Journal of Pattern Recognition Research*, 2008. vol. 3, no. 1, pp. 1–13 DOI: 10.13176/11.54.
6. Evtikhiev N. N., Kozlov A. V., Krasnov V. V., Rodin V. G., Starikov R. S., Cheremkhin P. A. A method for measuring digital camera noise by automatic segmentation of a striped target, *Computer Optics*, 2021. vol. 42, no. 2, pp. 267–276 DOI: 10.18287/2412-6179-CO-815.
7. Budunova K. A., Kravchenko V. F., Pustovoi V. I. Digital Frequency-Selective Filters Based on Spectra of Atomic Functions, *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2019. vol. 64, pp. 1095–1100 DOI: 10.1134/S1064226919100036.

8. Lukovenkova O., Marapulets Yu., Kim A., Tristanov A. A Complex Method for Automatic Detection of Geoacoustic Emission Pulses Preceding Earthquakes / *Proceedings*, 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon) (Vladivostok, Russia, October 03–04, 2018), 2018 DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602865.
9. Srikar G., Prasad Ch. R. An Enhanced Audio Noise Removal Based on Wavelet Transform and Filters, *Advances in Computational Sciences and Technology*, 2017. vol. 10, pp. 3111–3121.
10. Srivastava M., Anderson C. L., Freed J. H. A New Wavelet Denoising Method for Selecting Decomposition Levels and Noise Thresholds, *IEEE Access*, 2016. vol. 4, pp. 3862–3877 DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2587581.
11. *Advances in Wavelet Theory and Their Applications in Engineering, Physics and Technology*, eds. D. Baleanu: IntechOpen, 2012. 648 pp.
12. Donoho D. L. De-noising by soft-thresholding, *IEEE Transactions on Information Theory*, 1995. vol. 41, pp. 613–627 DOI: 10.1109/18.382009.
13. Cai T. On block thresholding in wavelet regression: Adaptivity, block size, and threshold level, *Statistica Sinica*, 2002. vol. 12, pp. 1241–1273.
14. Abramovich F., Benjamini Y., Donoho D. L., Johnstone I. M. Adapting to Unknown Sparsity by Controlling the False Discovery Rate, *The Annals of Statistics*, 2006. vol. 34, pp. 584–653 DOI: 10.1214/009053606000000074.
15. Johnstone I. M., Silverman B. W. Needles and Straw in Haystacks: Empirical Bayes Estimates of Possibly Sparse Sequences, *The Annals of Statistics*, 2004. vol. 32, pp. 1594–1649 DOI: 10.1214/009053604000000030.
16. Lukovenkova O. Application of adaptive wavelet thresholding to recovery geoacoustic signal pulse waveforms / *EPJ Web of Conferences*, volume 254, XII International Conference “Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors” (Paratunka, Kamchatka region, Russia, September 27–October 1, 2021), 2021 DOI: 10.1051/epjconf/202125402004.
17. Mallat S. G., Zhang Zh. Matching pursuits with time-frequency dictionaries, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993. vol. 41, no. 12, pp. 3397–3415 DOI: 10.1109/78.258082.



Луковенкова Ольга Олеговна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Лаборатории акустических исследований, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Паратунка, Россия
ORCID 0000-0003-2333-4292.



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.



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.



Щербина Альберт Олегович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Лаборатории акустических исследований, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Паратунка, Россия
ORCID 0000-0002-7236-161X.

Modern methods of processing and analysis of geophysical pulse signals

O. O. Lukovenkova, M. A. Mishchenko, Yu. I. Senkevich, A. O. Shcherbina

Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, 684034, Paratunka, Mirnaya Str., 7, Russia

E-mail: o.o.lukovenkova@yandex.ru

The studies of various physical fields are conducted at Institute of cosmophysical research and radio wave propagation. The signals recorded during such studies often have pulse nature, i. e., they are sequences of pulses. The paper observes modern methods of digital signal processing which can be used for the analysis of geophysical pulse signals. To search for signal fragments which contain anomalies, the digital filtering within seven frequency bands and further averaging over 1-second intervals are proposed. To isolate single pulses under conditions of permanent background noise, the adaptive threshold scheme is used. To remove noise and to separate the informal part of the signals, wavelet thresholding is applied. To analyse the time-frequency content of pulses, the authors offer sparse approximation method. To study peculiarities of pulse shape, the transformation of a pulse into the binary matrix which uniquely determines the pulse form.

Key words: pulse signals, signal processing, signal analysis.

 DOI: 10.26117/2079-6641-2022-41-4-120-136

Original article submitted: 01.12.2022

Revision submitted: 01.12.2022

For citation. Lukovenkova O. O., Mishchenko M. A., Senkevich Yu. I., Shcherbina A. O. Modern methods of processing and analysis of geophysical pulse signals. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2022, 41: 4, 120-136.  DOI: 10.26117/2079-6641-2022-41-4-120-136

Competing interests. The authors declare that 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.

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

© Lukovenkova O. O. et al., 2022

Funding. The research was carried out as part of the implementation of the state assignment AAAA-A21-121011290003-0.

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 (In Russian).
- [2] Druzhin G. I., Bashkuev Yu. B., Naguslaeva I. B., Cherneva N. V., Shevtsov B. M. Lightning according to electromagnetic field observations in Buryatiya, Proceedings of 22nd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, Tomsk, Russian Federation, November 29, 2016, 10035. DOI: 10.1117/12.2247926
- [3] Marapulets Yu. V., Shevtsov B. M. Mezomasshtabnaja akusticheskaja jemissija [Mesoscale acoustic emission]. Vladivostok, Dalnauka, 2012, 126 (In Russian).
- [4] Fu K. S., Mui J. K. A survey on image segmentation, Pattern Recognition, 1981, 13:1, 3–16. DOI: 10.1016/0031-3203(81)90028-5
- [5] Frucci M., Sanniti G., Sanniti di Baja G. From Segmentation to Binarization of Gray-Level Images, Journal of Pattern Recognition Research, 2008, 3:1, 1–13. DOI: 10.13176/11.54
- [6] Evtikhiev N. N., Kozlov A. V., Krasnov V. V., Rodin V. G., Starikov R. S., Cheremkhin P. A. A method for measuring digital camera noise by automatic segmentation of a striped target, Computer Optics, 2021, 4:2, 267–276. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-815
- [7] Budunova K. A., Kravchenko V. F., Pustovoit V. I. Digital Frequency-Selective Filters Based on Spectra of Atomic Functions, Journal of Communications Technology and Electronics, 2019, 64, 1095–1100. DOI: 10.1134/S1064226919100036
- [8] Lukovenkova O., Marapulets Yu., Kim A., Tristanov A. A Complex Method for Automatic Detection of Geoacoustic Emission Pulses Preceding Earthquakes, Proceedings of International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, October 03–04, 2018. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602865
- [9] Srikar G., Prasad Ch. R. An Enhanced Audio Noise Removal Based on Wavelet Transform and Filters, Advances in Computational Sciences and Technology, 2017, 10, 3111–3121.
- [10] Srivastava M., Anderson C. L., Freed J. H. A New Wavelet Denoising Method for Selecting Decomposition Levels and Noise Thresholds, IEEE Access, 2016, 4, 3862–3877. DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2587581
- [11] Advances in Wavelet Theory and Their Applications in Engineering, Physics and Technology, by D. Baleanu (editor). IntechOpen, 2012, 648.
- [12] Donoho D. L. De-noising by soft-thresholding, IEEE Transactions on Information Theory, 1995, 41, 613–627. DOI: 10.1109/18.382009
- [13] Cai T. On block thresholding in wavelet regression: Adaptivity, block size, and threshold level, Statistica Sinica, 2002, 12, 1241–1273.
- [14] Abramovich F., Benjamini Y., Donoho D. L., Johnstone I. M. Adapting to Unknown Sparsity by Controlling the False Discovery Rate, The Annals of Statistics, 2006, 34, 584–653. DOI: 10.1214/009053606000000074
- [15] Johnstone I. M., Silverman B. W. Needles and Straw in Haystacks: Empirical Bayes Estimates of Possibly Sparse Sequences, The Annals of Statistics, 2004, 32, 1594–1649. DOI: 10.1214/009053604000000030
- [16] Lukovenkova O. Application of adaptive wavelet thresholding to recovery geoacoustic signal pulse waveforms, EPJ Web of Conferences, vol. 254, Proceedings of XII International Conference “Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake

Precursors”, Paratunka, Kamchatka region, Russia, September 27–October 1, 2021. DOI: 10.1051/epjconf/202125402004

- [17] Mallat S. G., Zhang Zh. Matching pursuits with time-frequency dictionaries, IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41:12, 3397–3415. DOI: 10.1109/78.258082



Lukovenkova Olga Olegovna – PhD (Tech.), Senior Researcher, Laboratory of Acoustic Research, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Paratunka, Russia
 ORCID 0000-0003-2333-4292.



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.



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.



Shcherbina Albert Olegovich✉ – PhD (Phys. & Math.), Senior Researcher, Laboratory of Acoustic Research, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Paratunka, Russia,  ORCID 0000-0002-7236-161X.
