

УДК 621.391:534.23

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РАЗРЕЖЕННОЙ АППРОКСИМАЦИИ В ЗАДАЧАХ АНАЛИЗА СИГНАЛОВ ГЕОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Марапулец Ю.В., к.т.н., Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, marpl@ikir.ru

Тристанов А.Б., к.т.н., Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, lex3@ikir.ru

Ключевые слова: геоакустический сигнал, сейсмика, частотно-временной анализ, разреженная аппроксимация.

Введение

С 1999 года на полуострове Камчатка проводится изучение геоакустической эмиссии на различных стадиях сейсмической активности. Особенностью наблюдений является использование для регистрации сигналов широкополосных пьезокерамических гидрофонов, установленных в естественных и искусственных водоемах. Применение приемников такого типа позволяет по сравнению со стандартными геофонами расширить частотный диапазон регистрации до 0.1 Гц – 11 кГц. Сбор информации производится в цифровом виде в стандартном формате звуковых данных типа «wave». Одновременно с регистрацией широкополосного сигнала осуществляется цифровая фильтрация в семи частотных поддиапазонах: 0.1-10, 30-60, 70-200, 200-600, 600-2000, 2000-6500, 6500-11000 Гц с последующим детектированием, интегрированием и синхронной записью отчетов с частотой 0.25 Гц по каждому из 4 каналов, различающихся пространственной ориентацией гидрофонов. Такие измерительные системы установлены на трех пунктах: обсерватории «Паратунка» и удаленных от нее на 20 км и 4 км, соответственно, станциях «Карымшина» и «Микижа». Одновременно с записью геоакустического сигнала регистрируются метеорологические величины: атмосферное давление, температура воздуха, его относительная влажность, скорость ветра и интенсивность осадков. Все станции охвачены системой связи по радиомодемам и синхронизации времени по GPS.

В ходе исследований было установлено, что в условиях хорошей погоды за 1-3 суток перед сильными землетрясениями на расстояниях первых сотен километров регистрируются аномалии геоакустической эмиссии в килогерцевых диапазонах частот [1]. Сигналы на таких частотах не могут распространяться из эпицентров землетрясений по причине сильного затухания (коэффициент ослабления амплитуды в ϵ раз составляет 230 – 480 дБ/км) и являются откликом среды в месте регистрации

Предложен новый подход для частотно-временного анализа геоакустической эмиссии, основанный на методе разреженной аппроксимации. Рассмотрены примеры применения метода для анализа реальных геоакустических импульсов. Целесообразно использование метода для частотно-временного анализа любых геофизических сигналов импульсной природы.

на изменение ее напряженно-деформируемого состояния. Это было подтверждено результатами совместных исследований геоакустической эмиссии и деформаций земной поверхности с применением лазерного деформографа-интерферометра [2].

Анализ геоакустического сигнала показывает, что он состоит из серии релаксационных колебаний (импульсов) с ударным возбуждением, амплитудой 0.1 – 1 Па, длительностью, не превышающей 200 мс, частотным заполнением в единицы и первые десятки килогерц [3]. В качестве примера на рис. 1а представлен 3-х минутный фрагмент записи такого геоакустического сигнала, а на рис. 1б – одиночный импульс из этого фрагмента. Частота следования импульсов определяется деформациями пород и может меняться в широких пределах – от одиночных сигналов на временном интервале несколько секунд в спокойный период до десятков и даже сотен в секунду в моменты аномалий перед землетрясениями [1, 3, 4]. Поскольку прочность пород по отношению к касательным напряжениям меньше, чем к сжатию, основными источниками эмиссии будут сдвиговые [4]. Фронт и начало спада импульса, обычно длительностью до 25 мс и отношением сигнал/шум до 30 раз, позволяют определить направление на источник [3, 4], а частоты заполнения содержат информацию о его размерах и динамике [1]. Поэтому частотно-временной анализ геоакустических сигналов очень важен для исследования источников эмиссии и, в конечном итоге, понимания природы возникновения аномалий перед землетрясениями. Но, несмотря на разнообразие существующих частотно-временных методов (оконное преобразование Фурье, вейвлет-преобразование, вейвлет-пакеты и т.д.) эффективно задача такого анализа импульсных геоакустических сигналов до настоящего времени не решена.

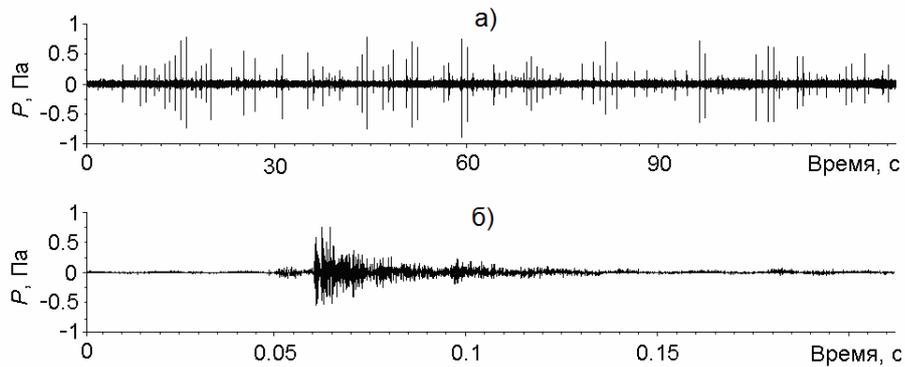


Рис. 1. Фрагмент широкополосной записи геоакустической эмиссии (а) и одиночного импульса из этого фрагмента (б), P – акустическое давление.

В работе предлагается новый подход к частотно-временному анализу высокочастотной геоакустической эмиссии, основанный на методах разреженной аппроксимации. Эти методы находят широкое применение в исследовании сложных сигналов различной природы, в частности при анализе сейсмических сигналов [5], в гидроакустике [6], задачах неразрушающего контроля [7, 8].

Форма представления сигнала

Пусть дано семейство функций $\{g_m(n) : m = 0..M-1, n = 0..N-1, \|g_m\| = 1\}$, назовем его словарем атомов D .

Рассмотрим сигнал $\{f(n) : n = 0..N-1\}$, $N < M$. Данный сигнал может быть представлен как суперпозиция атомов словаря:

$$f(n) = \sum_{m=0}^{M-1} a_m g_m(n),$$

или, тоже самое, в матричной форме

$$\begin{pmatrix} f(0) \\ f(1) \\ f(2) \\ \vdots \\ f(N-1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_0(0) & g_1(0) & g_2(0) & g_3(0) & \cdots & g_{M-2}(0) & g_{M-1}(0) \\ g_0(1) & g_1(1) & g_2(1) & g_3(1) & \cdots & g_{M-2}(1) & g_{M-1}(1) \\ g_0(2) & g_1(2) & g_2(2) & g_3(2) & \cdots & g_{M-2}(2) & g_{M-1}(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ g_0(N-1) & g_1(N-1) & g_2(N-1) & g_3(N-1) & \cdots & g_{M-2}(N-1) & g_{M-1}(N-1) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ a_{M-2} \\ a_{M-1} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$f = Ga.$$

Система (1) является переопределенной. Вектор a можно рассматривать как возможную форму представления сигнала. Если число ненулевых элементов вектора a меньше (как правило, много меньше) M , то говорят о разреженной аппроксимации временного ряда f .

Задача моделирования сигнала с помощью словаря D заключается в поиске таких коэффициентов a , для которых

$$\min \|a\|_0 : f = Ga.$$

Представленная задача обладает значительной вычислительной сложностью. Mallat S. и Zhang Z. в работе [9] предложили новый подход к решению данной проблемы – метод согласованного преследования. Этот метод представляет собой итерационный алгоритм выбора из избыточного словаря D атомов, адаптированных к частотно-временной структуре сигнала. Согласованное преследование дает набор атомов, обеспечивающих «квазиоптимальное» представление временного ряда путем поиска коэффициентов a , минимизирующих ошибку с помощью «жадного» алгоритма:

$$a : \|f - Ga\|_2 \rightarrow \min.$$

На первой итерации выбирается оптимальный атом g_m и его вклад вычитается из сигнала, далее оценивается вклад атомов в полученный остаток:

$$r^i = \begin{cases} f, & i = 0 \\ r^{i-1} - a_{m(i)} g_{m(i)}, & i > 0 \end{cases}.$$

Здесь $a_{m(i)}$ – коэффициент (вес) при выбранном $g_{m(i)}$ на i -й итерации.

Коэффициент $a_{m(i)}$ для каждого элемента словаря D определяется как ортогональная проекция r^{i-1} на элемент $g_{m(i)}$

$$a_{m(i)} = \langle r^{i-1}, g_m \rangle.$$

Оптимальным атомом считается тот, на котором достигается минимум энергии ошибки. Вес оптимального атома – максимальный среди всех коэффициентов a_m^i на i -й итерации:

$$a_{m(i)} = \max_{g_m \in D} \{a_m^i, m = 0..M-1\}.$$

Идея разложения методом согласованного преследования проиллюстрирована на рис. 2.

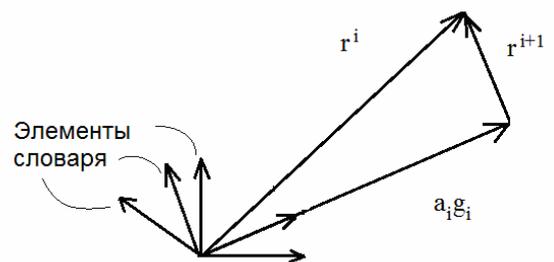


Рис. 2. Схема вычисления методом согласованного преследования

Вычисления можно сократить при использовании быстрых алгоритмов, которые позволяют вычислить скалярное произведение $\langle r^{i-1}, g_{m(i)} \rangle$ по уже вычисленному $\langle r^{i-1}, g_{m(i-1)} \rangle$:

$$\langle r^{i-1}, g_{m(i)} \rangle = \langle r^{i-1}, g_{m(i-1)} \rangle - a_{m(i)} \langle g_{m(i-1)}, g_m \rangle,$$

где $\langle g_{m(i-1)}, g_m \rangle$ вычисляется один раз, например на первой итерации.

Анализ скорости убывания ошибки разложения позволяет выбирать количество атомов, позволяющих достаточно подробно описать внутреннюю структуру сигнала. В соответствии с [10], ошибка аппроксимации определяется по формуле:

$$\|r^i\| \leq 2^{-\lambda i} \|f\|,$$

где λ – скорость сходимости, зависящая от длины сигнала. С учетом экспоненциального закона убывания ошибки число итераций, необходимых для получения достаточно точных аппроксимаций, невелико.

Элементом разложения может быть поставлено в соответствие частотно-временное распределение Вигнера-Вилля [10], определяемое как:

$$Ef(t, \omega) = \sum_{n=0}^{\infty} \left| \langle R^n f, g_{\gamma_n} \rangle \right|^2 Wg_{\gamma_n}(t, \omega),$$

где

$$Wg_{\gamma_n}(t, \omega) = 2e^{-2\pi \left(\frac{(t-u)^2}{s^2} + s^2(\omega-\xi)^2 \right)}.$$

Выбор словаря

Структура словаря определяется конкретной задачей. Примеры применения различных словарей можно найти, например, в работах [5 - 9, 11, 12]. Выбор элементов словаря диктуется структурными особенностями сигнала, которые, по возможности, должны обеспечивать минимальное, в части избыточности, представление исследуемого временного ряда. Для выбора словаря первоначально была проведена типологическая классификация сигналов геоакустической эмиссии. В первом приближении элементы сигнала могут быть описаны модулированными функциями Гаусса. На основе данного заключения в качестве словаря D был выбран предложенный в [9] словарь Габора, включающий

масштабированные, модулированные и сдвинутые по времени функции Гаусса $g(t)$:

$$D = \{g_{s,u,\xi}\} = \left\{ \frac{1}{\sqrt{s}} g\left(\frac{t-u}{s}\right) e^{j\xi(t-u)} \right\}.$$

Предлагаемый базис для согласованного преследования обеспечивает оптимальное представление внутренней структуры сложного сигнала, поскольку атомы Габора имеют лучшую, по сравнению с другими базисами, частотно-временную локализацию [10]. Для примера рассмотрим сигнал, состоящий из 4-х элементов, имеющих разные по протяженности высокочастотные и низкочастотные компоненты (рис. 3а):

$$f(t) = g\left(\frac{t-u_1}{s_1}\right) e^{j\omega_1 t} + g\left(\frac{t-u_2}{s_2}\right) e^{j\omega_2 t} + g\left(\frac{t-u_1}{s_2}\right) e^{j\omega_1 t} + g\left(\frac{t-u_2}{s_1}\right) e^{j\omega_2 t}.$$

На рис. 3б представлено разложение исследуемого сигнала. Видно, что всем элементам сигнала соответствуют атомы разложения, локализация которых в частотно-временной области соответствует ожидаемой.

Результаты анализа сигналов геоакустической эмиссии

Рассмотрим примеры частотно-временного анализа геоакустической эмиссии методом разреженной аппроксимации. При исследовании сигналов необходимо выбрать количество атомов, адекватно их описывающих. Для этого оценивалось убывание ошибки с ростом количества проведенных итераций.

На рис. 4 представлен фрагмент записи сигнала геоакустической эмиссии длительностью 0.5 с, спектрограмма и частотно-временная область с отмеченным распределением Вигнера-Вилля функций Габора, полученными в результате разложения методом согласованного преследования. Анализ данных показывает, что все атомы разложения группируются в окрестности наиболее «энергоемких» участков записи – импульсов, отражая их внутреннюю структуру. На рис. 5 представлен график спада ошибки. Видно, что достаточно около 30 итераций, чтобы атомы разложения охватили 80% энергии сигнала, т.е. достаточно адекватно описывали сигнал.

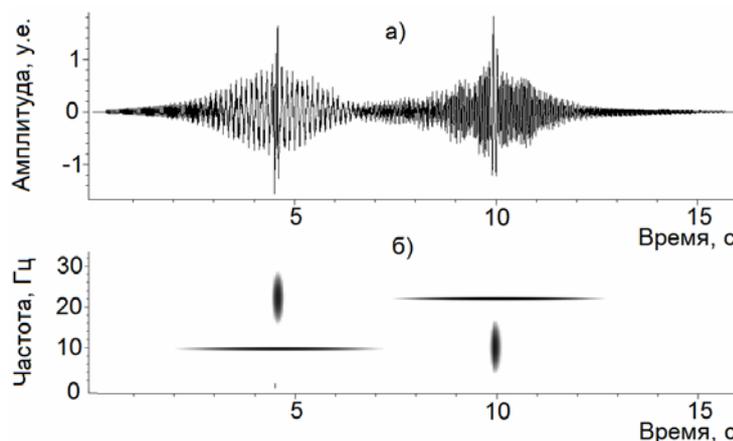


Рис. 3. Пример модельного сигнала (а) и распределение Вигнера-Вилля функций Габора, полученное в результате разложения методом согласованного преследования (б).

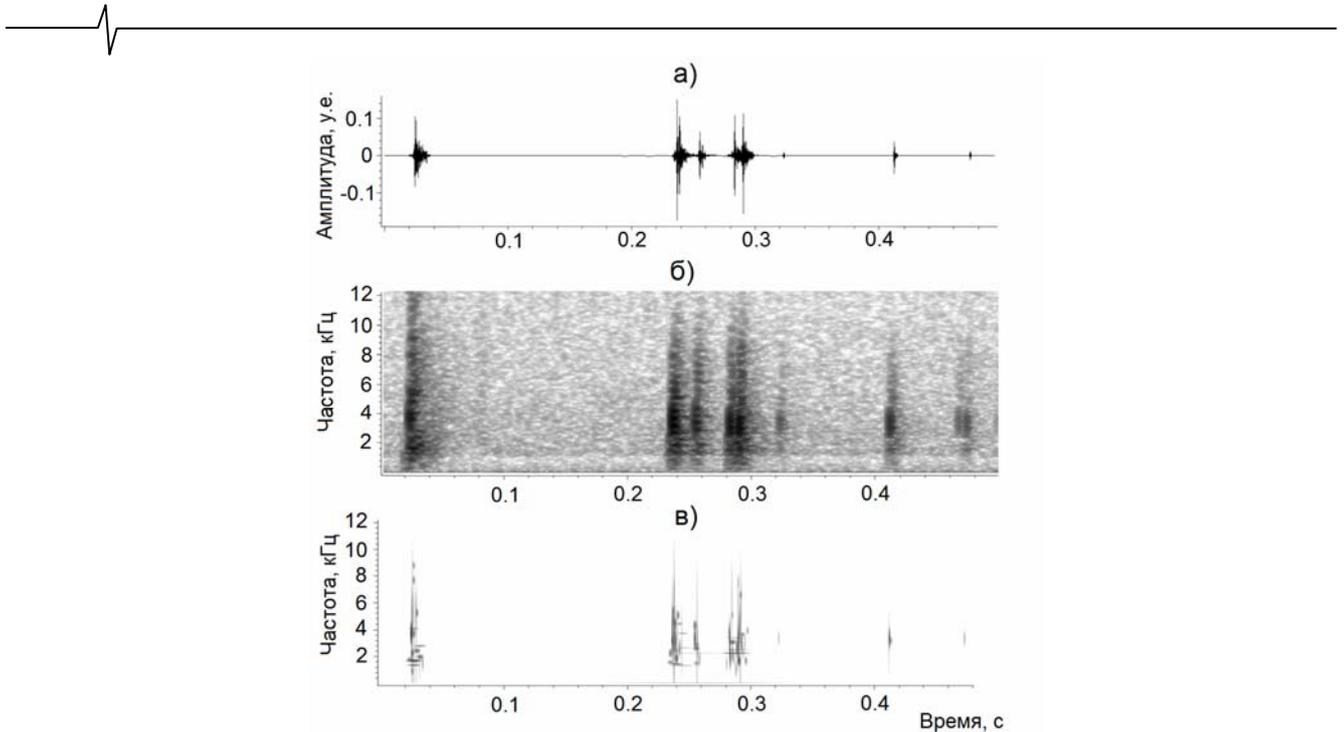


Рис. 4. Фрагмент записи сигнала геоакустической эмиссии (а), спектрограмма сигнала (б) и частотно-временная область с отмеченным распределением Вигнера-Вилля функций Габора, полученными в результате разложения методом согласованного преследования (в).

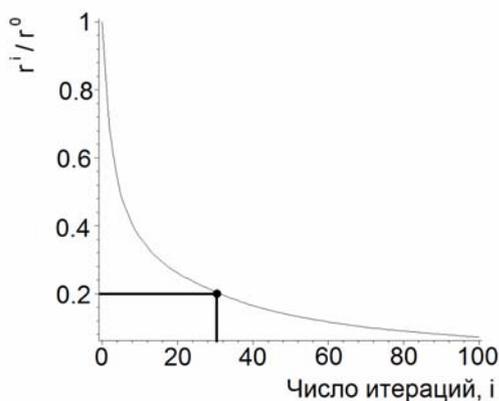


Рис. 5. Зависимость величины относительной ошибки от числа проведенных итераций.

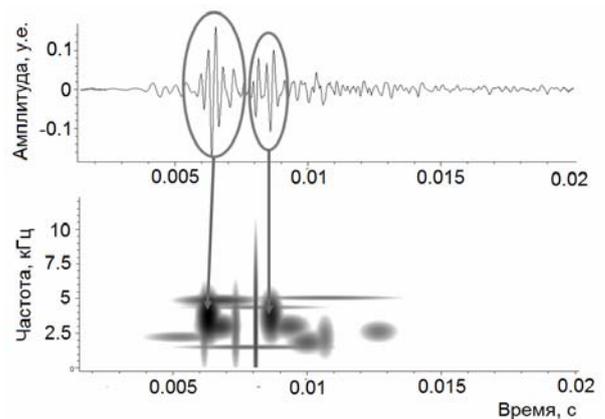


Рис. 6. Фрагмент записи геоакустического импульса и его разложение методом согласованного преследования

В разложении присутствуют несколько типичных по распределению энергии атомов:

1. Атомы, энергия которых локализована по времени, но распределена по частоте.
2. Атомы, энергия которых локализована по частоте, но распределена по времени.
3. Атомы, энергия которых локализована как по частоте, так и по времени.

Метод разреженной аппроксимации позволяет анализировать структуру отдельных импульсов, что невозможно при применении метода оконного преобразования Фурье. Каждый импульс представляется взвешенной суммой отдельных атомов, анализ взаимного расположения которых может давать информацию об источнике генерации и пути распространения сигнала. Проиллюстрируем это несколькими примерами.

На рис. 6 показан геоакустический импульс и резуль-

таты его разложения. Видно, что сигнал складывается из двух составляющих. Анализ частотно-временного расположения атомов позволяет предположить, что вторая составляющая является отражением основного сигнала (на рис. 6 отмечено стрелочками). Их частоты совпадают, а удлинение пути, рассчитанное с учетом времени задержки (2.5 мс) и скорости распространения звука в воде (1500 м/с) составляет 3.75 м. Эта величина соответствует случаю отражения сигнала от поверхности водоема.

На рис. 7 показан пример более сложного импульса. Анализ частотно-временного расположения атомов позволяет предположить, что в данном случае наблюдается сумма сигналов от разных источников, т.к. в разложении наблюдаются отдельные частотно-временные структуры. В соответствии с [1, 3] можно допустить, что источники сигналов имеют неодинаковые размеры.

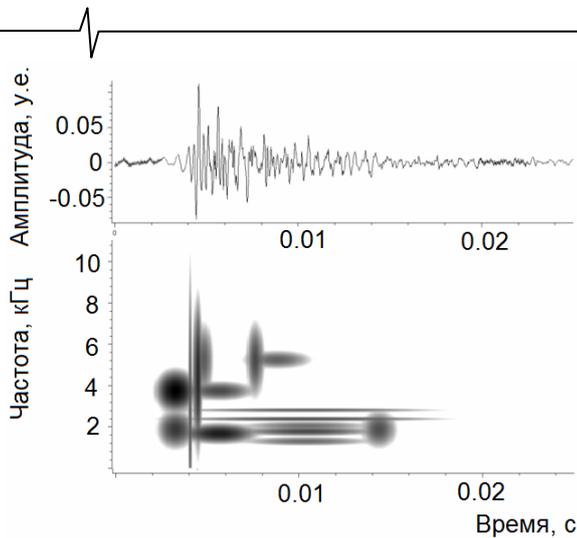


Рис. 7. Фрагмент записи геоакустического импульса и его разложение методом согласованного преследования

На рис. 8 показан пример последовательности геоакустических импульсов, по всей видимости, имеющих один источник, что подтверждается схожестью их частотно-временных структур.

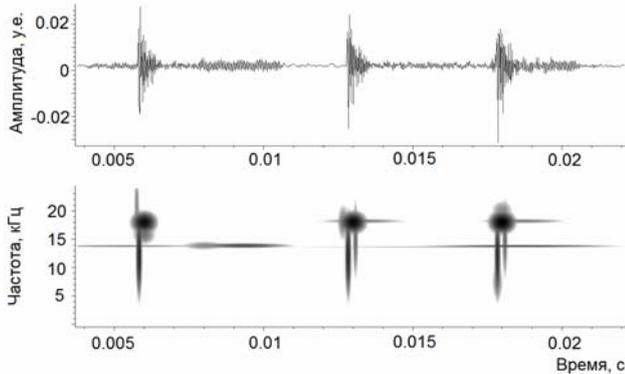


Рис. 8. Фрагмент записи последовательности геоакустических импульсов и их разложение методом согласованного преследования

Заключение

В работе предложен новый подход для частотно-временного анализа геоакустической эмиссии. В его основу положен метод разреженной аппроксимации временных рядов, позволяющий адекватно описывать сигналы импульсной природы. Использование метода для анализа реальных геоакустических импульсов позволяет выявлять внутреннюю структуру сигналов, обусловленную источниками их генерации.

Опыт использования метода разреженной аппроксимации позволяет сделать вывод о целесообразности его применения для частотно-временного анализа любых геофизических сигналов импульсной природы.

Литература

1. Купцов А. В., Ларионов И.А., Шевцов Б.М. Особенности геоакустической эмиссии при подготовке камчатских

2. землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2005, №5, С.45-59.
3. Долгих Г.И., Купцов А.В., Ларионов И.А., Марапулец Ю.В., Швец В.А., Шевцов Б.М., Широков О.Н., Чупин В.А., Яковенко С.В. Деформационные и акустические предвестники землетрясений// Доклады АН, 2007, Т.413, №1, С.96-100.
4. Марапулец Ю.В., Щербина А.О. Методы исследования пространственной анизотропии геоакустической эмиссии // Техническая акустика. 2008, 14. <<http://www.ejta.org>>
5. Шевцов Б. М., Марапулец Ю.В., Щербина А.О. О направленности приповерхностной высокочастотной геоакустической эмиссии в периоды деформационных возмущений // Доклады АН, 2010, Т.430, №1, С.119-122.
6. Chakraborty A., Okaya D. Frequency-time decomposition of seismic data using wavelet-based methods// Geophysics. Vol.60, 6, P.1906-1916.
7. Josso N. F., Zhang J. J., Papandreou-Suppappola A. et al. On the Characterization of time-scale underwater acoustic signal using matching pursuit decomposition // Proceedings of the IEEE of OCEANS Conference. P. 6, Biloxi, Miss, USA, 2009.
8. Ebenezer S. P., Papandreou-Suppappola A., Suppappola S. B. Classification of acoustic emissions using modified matching pursuit // EURASIP Journal on Applied Signal Processing. N.3, P. 347-357.
9. Kovvali N., Das S., Chakraborty D., Cochran D., Papandreou-Suppappola A., Chattopadhyay A. Time-frequency based classification of structural damage // AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 23 - 26 April 2007, Honolulu, Hawaii, P. 2007-2055.
10. Mallat S., Zhang Z. Matching pursuits with time-frequency dictionaries. IEEE Transactions on Signal Processing. N. 41(12), P.3397-3415.
11. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов: Пер с англ. – М.:Мир, 2005.
12. Goodwin M.M., Vetterli M. Matching pursuit and atomic signal models bases on recursive filter banks // IEEE Transactions on Signal Processing. N. 47(7), P.1890-1902.
13. McClure M.R., Carin L. Matching Pursuits with a wave-bases dictionary // IEEE Transactions on Signal Processing. N. 45(12), P.2912-2927.

USING THE SPARSE APPROXIMATION METHOD FOR THE PROBLEMS OF GEOACOUSTIC EMISSION ANALYSIS

Marapulets Yu.V., Tristanov A.B.

In the paper the novel approach of the geoaoustic emission time-frequency analysis, based on the method of sparse approximation is suggested. Examples of the method application for real geoaoustic impuls analysis is regarded. Using the time-frequency analysis method for any impulse nature geophysical signals is expedient.