

ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ ГЕОАКУСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ АДАПТИВНОГО СОГЛАСОВАННОГО ПРЕСЛЕДОВАНИЯ

© 2021 г. Ю. В. Марапулец^а, *, О. О. Луковенкова^а

^аФедеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук,
ул. Мирная 7, с. Паратунка, Камчатский край, 683034 Россия

*e-mail: marpl@ikir.ru

Поступила в редакцию 26.01.2021 г.

После доработки 09.03.2021 г.

Принята к публикации 10.03.2021 г.

Показаны результаты применения разработанного подхода на основе методов разреженной аппроксимации для частотно-временного анализа геоакустических данных. Приведены описания разреженного представления геоакустического сигнала и разработанного алгоритма адаптивного согласованного преследования с использованием комбинированного словаря, состоящего из функций Берлаге и Гаусса. Представлены результаты частотно-временного анализа геоакустических сигналов. Показаны выявленные с помощью предложенного подхода особенности, возникающие в частотно-временных структурах геоакустических данных перед землетрясениями. Статья подготовлена по материалам доклада на 3-й Всероссийской акустической конференции (21–25 сентября 2020 г., г. Санкт-Петербург).

Ключевые слова: акустическая эмиссия, геоакустические данные, частотно-временной анализ, разреженная аппроксимация, адаптивное согласованное преследование

DOI: 10.31857/S0320791921030096

ВВЕДЕНИЕ

Акустическая эмиссия в твердых телах представляет собой упругие колебания, возникающие в результате дислокационных изменений в среде. Характеристики возбуждаемого при этом импульсного излучения непосредственно связаны с особенностями пластических процессов, чем и обусловлен интерес к исследованиям эмиссии с целью развития методов акустической диагностики сред. Исследования на Камчатке показали эффективность применения акустических методов диагностирования природных сред на масштабах, соответствующих длинам волн звуковых колебаний [1]. Выявлена связь между активизацией деформационных процессов и поведением акустической эмиссии, в том числе при подготовке землетрясений [2, 3]. Особенностью экспериментов является использование для регистрации акустической эмиссии широкополосных пьезокерамических гидрофонов, установленных у дна естественных и искусственных водоемов. Применение приемников такого типа позволяет по сравнению со стандартными геофонами изменить верхнюю границу частотного диапазона с 1 до 20 кГц. Одновременно для изучения простран-

ственной структуры акустической эмиссии и характера движения частиц среды в волне применяются трехкомпонентные векторные приемники с тем же диапазоном частот [4, 5].

Анализ геоакустического сигнала показывает, что он состоит из серии релаксационных колебаний (импульсов) различной амплитуды и длительности, с ударным возбуждением и частотой заполнения от сотен герц до десятков килогерц. Частота следования импульсов определяется деформациями пород и может меняться в широких пределах — от одиночных сигналов на временном интервале длительностью несколько секунд в спокойный период до десятков и даже сотен в секунду в моменты аномалий перед землетрясениями [3, 6]. Поскольку прочность пород по отношению к касательным напряжениям меньше, чем к сжатию, основными источниками эмиссии будут сдвиговые волны [6]. Наиболее информативная часть импульса — фронт и начало спада, обычно длительностью до 25 мс и отношением сигнал/шум до 30 раз — позволяет определить направление на источник [6–8], а частоты заполнения содержат информацию о его размерах и динамике [3, 6, 7]. Поэтому частотно-временной

анализ геоакустических сигналов очень важен для исследования источников эмиссии и, в конечном итоге, для диагностики особенностей деформационного процесса. В настоящее время частотно-временной состав геоакустических сигналов оценивается с использованием полосовых фильтров [1, 5] и преобразования Фурье [3]. Однако применение данных методов, а также технологий, используемых для решения подобных задач в смежных областях науки (вейвлет-преобразование, вейвлет-пакеты и т.д.), осложняется несколькими причинами:

- существенная неоднородность природных сред и плохое распространение в них упругих колебаний приводит к сильному искажению и ослаблению геоакустических сигналов, которое ограничивает возможности методов исследования;

- широкое разнообразие временных форм сигналов требует применения адаптирующихся под конкретный сигнал методов анализа;

- короткая длительность и сильная зашумленность природными и техногенными шумами усложняет анализ внутренней структуры импульсов.

В [9, 10] авторами предложен новый подход к частотно-временному анализу геоакустических данных, основанный на методе разреженной аппроксимации. Этот метод используется при исследовании сложных сигналов различной природы, в частности при анализе землетрясений [11], в гидроакустике [12], задачах неразрушающего контроля [13–15]. В ходе реализации предложенного подхода разработан алгоритм адаптивного согласованного преследования с использованием комбинированного словаря из функций Берлаге и Гаусса [16]. В настоящей работе представлены результаты применения данного подхода для частотно-временного анализа геоакустических сигналов, зарегистрированных на заключительной стадии подготовки землетрясений.

РАЗРЕЖЕННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ АКУСТОЭМИССИОННОГО СИГНАЛА

В общем случае модель геоакустического сигнала $x(t)$ представляет собой сумму функций полезного импульсного сигнала $s(t)$ и шума $\varepsilon(t)$, $x(t) = s(t) + \varepsilon(t)$. Пусть функции $s(t)$ и $\varepsilon(t)$ принадлежат линейному нормированному пространству $L^2(\mathbf{R})$ и трудно представимы в аналитическом виде. Их можно аппроксимировать рядом функций из $L^2(\mathbf{R})$, локализованных по частоте и времени. В терминах разреженной аппроксимации набор таких функций называют словарем \mathbf{D} , а его элементы – частотно-временными атомами, далее атомами [17].

Задача разреженной аппроксимации заключается в построении оценки разреженного представления полезного сигнала и шума по некоторому словарю, содержащему N атомов $\mathbf{D} = \{g_i(t), 0 \leq i \leq N-1\}$ [17, 18]:

$$\begin{cases} x(t) = \sum_{i=0}^{N-1} a_i g_i(t) + \sum_{i=0}^{N-1} b_i g_i(t) + R(t), & 0 \leq t \leq T, \\ \|R(t)\| \rightarrow \min, \\ \|\mathbf{a}\|_0 + \|\mathbf{b}\|_0 \rightarrow \min, \end{cases} \quad (1)$$

где $\mathbf{a} = \{a_i, 0 \leq i \leq N-1\}$ – вектор коэффициентов разложения полезного сигнала, $\mathbf{b} = \{b_i, 0 \leq i \leq N-1\}$ – вектор коэффициентов разложения шумовой составляющей, $g_i(t) \in \mathbf{D}$ – частотно-временные атомы, $R(t)$ – невязка, $[0; T]$ – интервал наблюдения сигнала, $\|\cdot\|_0$ – псевдонорма, равная числу ненулевых элементов вектора.

Выбор словаря \mathbf{D} существенно влияет на качество аппроксимации. Использование различных словарей при аппроксимации одного и того же сигнала приводит к отличиям как по разреженности, так и по точности. Поэтому при выборе функций, составляющих конкретный словарь, необходимым условием является соответствие их форм реальным сигналам. В сейсморазведке для аналитического описания сейсмоакустических колебаний наиболее часто используются формулы Н.Н. Пузырева (импульсы Гаусса) и Г.П. Берлаге [19]. С учетом известного свойства спектрально-временного самоподобия акустоэмиссионных сигналов авторы посчитали целесообразным использовать данные формы импульсов и для разреженной аппроксимации более высокочастотных геоакустических сигналов [16].

Функции Гаусса, имеющие наименьшую площадь частотно-временного окна (рис. 1а), аналитически представляются следующим образом:

$$g(t) = A \exp(-B_{\text{lim}}(T_{\text{end}})\Delta t^2) \cos(2\pi f t), \quad (2) \\ -T_{\text{end}}/2 \leq t \leq T_{\text{end}}/2,$$

где A – амплитуда, которая выбирается таким образом, чтобы атом имел следующую нормировку $\|g(t)\| = 1$, $A > 0$; T_{end} – длина атома; $B = B_{\text{lim}} \Delta$ – параметр, отвечающий за крутизну огибающей, $B > 0$; B_{lim} – предельное значение параметра B , которое вычисляется относительно T_{end} так, чтобы на границе области определения амплитуда импульса составляла не более 5% от максимального значения; f – частота заполняющей гармоники в Гц; Δ – коэффициент варьирования параметра B относительно предельного значения.

Функции Берлаге, которые имеют короткий передний фронт и длительный спад (рис. 1б), аналитически представляются следующим образом:

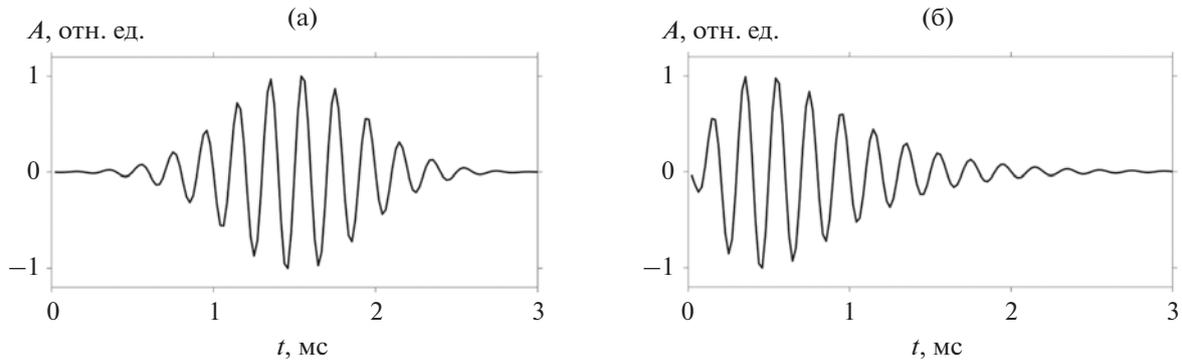


Рис. 1. Примеры базисных функций: (а) – Гаусса, (б) – Берлаге.

$$g(t) = At^{n_{lim}(p_{max})\Delta} \exp\left(-\frac{n_{lim}(p_{max})\Delta}{p_{max}T_{end}}t\right) \sin(2\pi ft), \quad (3)$$

$$0 \leq t \leq T_{end},$$

где A – амплитуда, которая выбирается таким образом, чтобы атом имел нормировку $\|g(t)\| = 1, A > 0$; T_{end} – длина атома; p_{max} – положение максимума огибающей относительно длины атома, $0 < p_{max} < 0.5$; $n = n_{lim} \Delta$ – параметр, отвечающий за крутизну огибающей, $n > 0$; n_{lim} – предельное значение параметра n , которое вычисляется относительно p_{max} так, чтобы на границе области определения амплитуда импульса составляла не более 5% от максимального значения; f – частота заполняющей гармоники в Гц; Δ – коэффициент варьирования параметра n относительно предельного значения.

Для предложенных словарей экспериментальным способом были подобраны диапазоны значений для каждого параметра T_{end}, p_{max}, Δ и f , позволяющие аппроксимировать геоакустические сигналы с заданной точностью. Набор параметров T_{end}, p_{max}, Δ и f однозначно определяет форму атома.

Анализ геоакустических сигналов с использованием словарей Гаусса и Берлаге показал, что функции Гаусса точнее аппроксимируют зашумленные участки сигнала, а функции Берлаге – участки сигнала, содержащие импульсы [16]. С учетом этого для улучшения качества аппроксимации геоакустических данных был создан комбинированный словарь, включающий и функции Берлаге, и функции Гаусса. Было установлено, что использование данного словаря позволяет строить компактные разреженные представления акустоэмиссионных сигналов (5–6 ненулевых коэффициентов разложения) при допустимой ошибке $ERR = \|R(t)\|/\|x(t)\|$ не более 5%.

АДАПТИВНОЕ СОГЛАСОВАННОЕ ПРЕСЛЕДОВАНИЕ

Алгоритм точного решения задачи разреженной аппроксимации требует полного перебора всех возможных комбинаций атомов из словаря, т.е. имеет факториальную вычислительную сложность $O(N!)$. Одним из алгоритмов приближенного решения является алгоритм согласованного

Таблица 1. Характеристики землетрясений, используемых при анализе

№ п/п	Дата и время, UT	Энергетический класс, K_s	Магнитуда, M_L	Эпицентральное расстояние, км	Глубина, км
1	29.03.2017 г., 04:09:22	15.0	6.8	562.8	43
2	17.07.2017 г., 23:34:08	16.1	7.3	728.0	7
3	22.12.2017 г., 14:44:16	14.2	6.4	205.7	69
4	23.05.2018 г., 01:37:44	14.2	6.4	376.5	56
5	06.07.2018г., 01:40:03	14.9	6.7	167.2	75
6	10.08.2018 г., 18:12:03	13.6	6.1	556.8	60
7	15.09.2018 г., 15:40:12	13.6	6.1	369.6	68
8	09.10.2018 г., 07:45:08	14.0	6.3	422.9	57
9	28.03.2019 г., 22:06:48	14.0	6.3	289.7	49
10	25.06.2019 г., 09:05:39	14.3	6.4	549.6	57

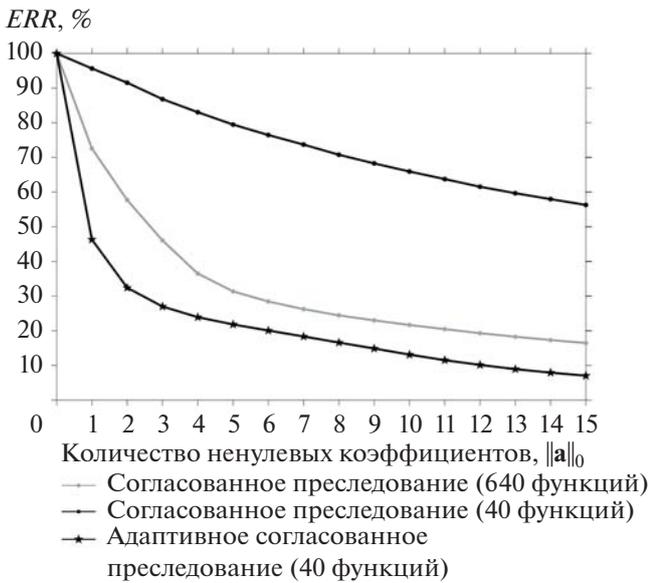


Рис. 2. Спад ошибки ERR для алгоритмов согласованного преследования и адаптивного согласованного преследования.

преследования (Matching Pursuit, MP) [20]. Его можно описать в виде следующей итерационной процедуры:

$$\begin{cases} R_0(t) = x(t), \\ (m, h) = \arg \left[\max_{k,j} \left| \langle g_k(t - \tau_j), R_i(t) \rangle \right| \right], \\ R_{i+1}(t) = R_i(t) - \langle g_m(t - \tau_h), R_i(t) \rangle g_m(t - \tau_h), \end{cases} \quad (4)$$

где $R_i(t)$ — невязка; τ — сдвиг функции $g(t)$ относительно сигнала $x(t)$; $\langle f, g \rangle$ — скалярное произведение.

У алгоритма согласованного преследования имеется ряд существенных недостатков. Во-первых, для обеспечения достаточной точности разреженных представлений требуется использование словарей больших объемов, что вызывает экспоненциальный рост времени выполнения алгоритма (вычислительная сложность алгоритма согласованного преследования — $O(N^2 \log_2 N)$). Во-вторых, поскольку выбор функций осуществляется из неменяющегося словаря, полученные представления отличаются «грубой» дискретизацией параметров (T_{end} , p_{max} , Δ и f). Для решения вышеперечисленных проблем данный классический алгоритм был улучшен таким образом, чтобы на словарях ограниченного размера можно было строить аппроксимации требуемой точности и тем самым экономить вычислительные ресурсы. Поскольку на каждой итерации алгоритма (4) определяются параметры и сдвиг атома, имеющего наибольшее по модулю скалярное произведение с сигналом, то итерацию согласованного пре-

следования можно описать в виде задачи поиска максимума функции многих переменных:

$$F(\tau, \mathbf{p}) = \left| \langle R(t), g(t - \tau, \mathbf{p}) \rangle \right| \rightarrow \max_{\mathbf{p}}. \quad (5)$$

Для уточнения параметров \mathbf{p} функции (T_{end} , p_{max} , Δ и f), имеющей максимальное по абсолютной величине скалярное произведение с сигналом, можно применять методы оптимизации, например, сеточного поиска. Модифицированный таким образом алгоритм был назван «адаптивное согласованное преследование» (Adaptive Matching Pursuit, AMP) [16, 21, 22].

Применение алгоритма адаптивного согласованного преследования уменьшает объем затрачиваемых вычислительных ресурсов в несколько раз, так как для получения разреженных аппроксимаций заданной точности можно использовать словари меньшего размера (рис. 2).

Результаты использования предложенного алгоритма для анализа данных показывают, что он позволяет более точно по сравнению с классическими частотно-временными методами оценивать внутреннюю структуру импульсов геоакустической эмиссии. Для примера на рис. 3 приведена оценка структуры модельного геоакустического сигнала со следующими характеристиками: частота дискретизации — 48 кГц, длительность — 3 мс, состоит из трех импульсов с частотами 11, 9, 8 кГц (рис. 3а). Оценка спектральной плотности мощности позволяет выявить только две частоты из трех (рис. 3б). На спектрограмме сигнала (рис. 3в) три импульса сливаются в одну структуру. Использование же адаптивного согласованного преследования (рис. 3г) позволяет выделить в сигнале частотно-временные структуры всех трех импульсов. Следовательно, оценка частотно-временной структуры импульса, полученная данным способом, наиболее близка к реальной структуре сигнала. Для визуализации разреженных представлений отдельных сигналов в частотно-временной области использовалось преобразование Вигнера—Вилла, которое в настоящее время достаточно широко применяют при спектральном анализе в различных областях науки, например, акустике живых систем [23]. На рис. 4 показаны примеры частотно-временного анализа фрагментов реального геоакустического сигнала. Сигнал, изображенный на рис. 4а, содержит три однотипных импульса с несущими частотами 14.1–19.5 кГц. На рис. 4б изображен сигнал акустической эмиссии, содержащий семь импульсов: два небольшой амплитуды с частотным заполнением 13–18 кГц и пять импульсов со сложной внутренней структурой. На рис. 4в изображен геоакустический сигнал, содержащий семь однотипных импульсов с простой внутренней структурой и частотами 17–18 кГц. На рис. 4г изображен сигнал, включающий шесть импульсов с частотами 18.4–19 кГц,

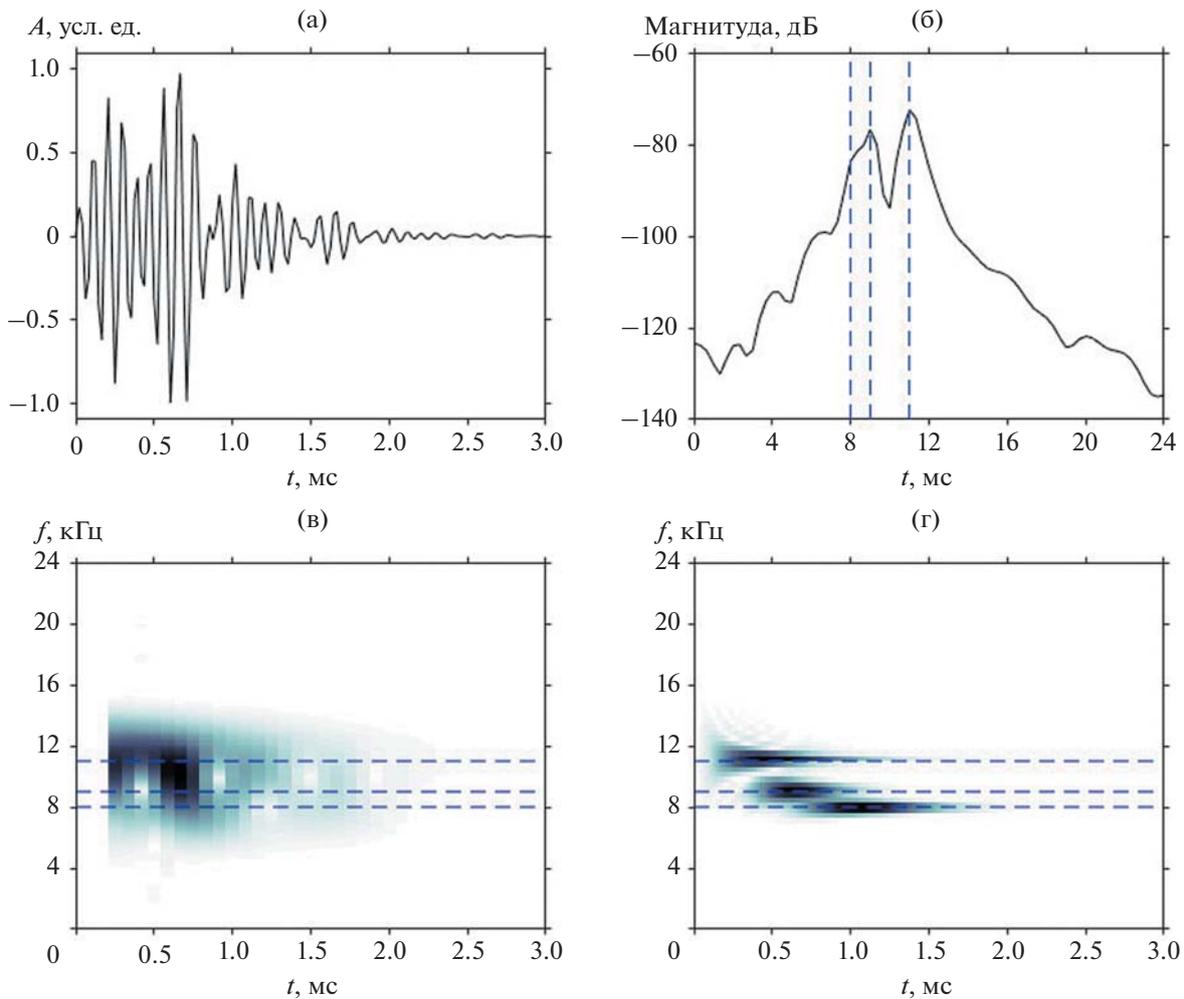


Рис. 3. Сравнение методов оценки внутренней структуры геоакустического сигнала: (а) – сигнал, (б) – оценка спектральной плотности мощности методом быстрого преобразования Фурье, (в) – спектрограмма, (г) – преобразование Вигнера–Вилла разреженного представления сигнала, полученного адаптивным согласованным преследованием. Пунктирными линиями обозначены частоты входящих в состав сигнала импульсов – 11, 9, 8 кГц.

помимо импульсов данный сигнал содержит низкочастотную трендовую компоненту ($f \leq 900$ Гц).

Программа, реализующая алгоритм адаптивного согласованного преследования, была разработана с использованием технологии CUDA (параллельные вычисления на графических процессорах NVIDIA). Такая параллельная реализация данного алгоритма в среднем выполняется в 8 раз быстрее последовательной. Это позволяет производить обработку геоакустических сигналов в режиме реального времени, несмотря на высокую вычислительную сложность алгоритма $O(N^2 \log_2 N)$.

АНАЛИЗ ГЕОАКУСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Исследованиями на Камчатке установлено, что на заключительной стадии подготовки землетрясений в условиях роста напряжений в приповерхностных осадочных породах проявляется вы-

сокочастотный акустоэмиссионный эффект, заключающийся в увеличении интенсивности геоакустического излучения в килогерцовом диапазоне частот. Одновременно наблюдается ярко выраженная анизотропия направленности излучения, обусловленная ориентацией источников акустических колебаний в поле напряжений пород [1, 5–7, 24]. Таким образом, во время проявления данного эффекта при подготовке землетрясений меняются характеристики источников излучения, что в свою очередь должно привести и к изменению частотно-временного состава выявляемых геоакустических импульсов. Для подтверждения этого с применением алгоритма адаптивного согласованного преследования был произведен анализ состава геоакустических импульсов за 8 дней перед сильным землетрясением, произошедшим 30.01.2016 г. в 03:25 UT (магнитуда $M_W - 7.2$, координаты эпицентра – 53.85° с.ш., 159.03° в.д., глубина – 185 км). Было выявлено

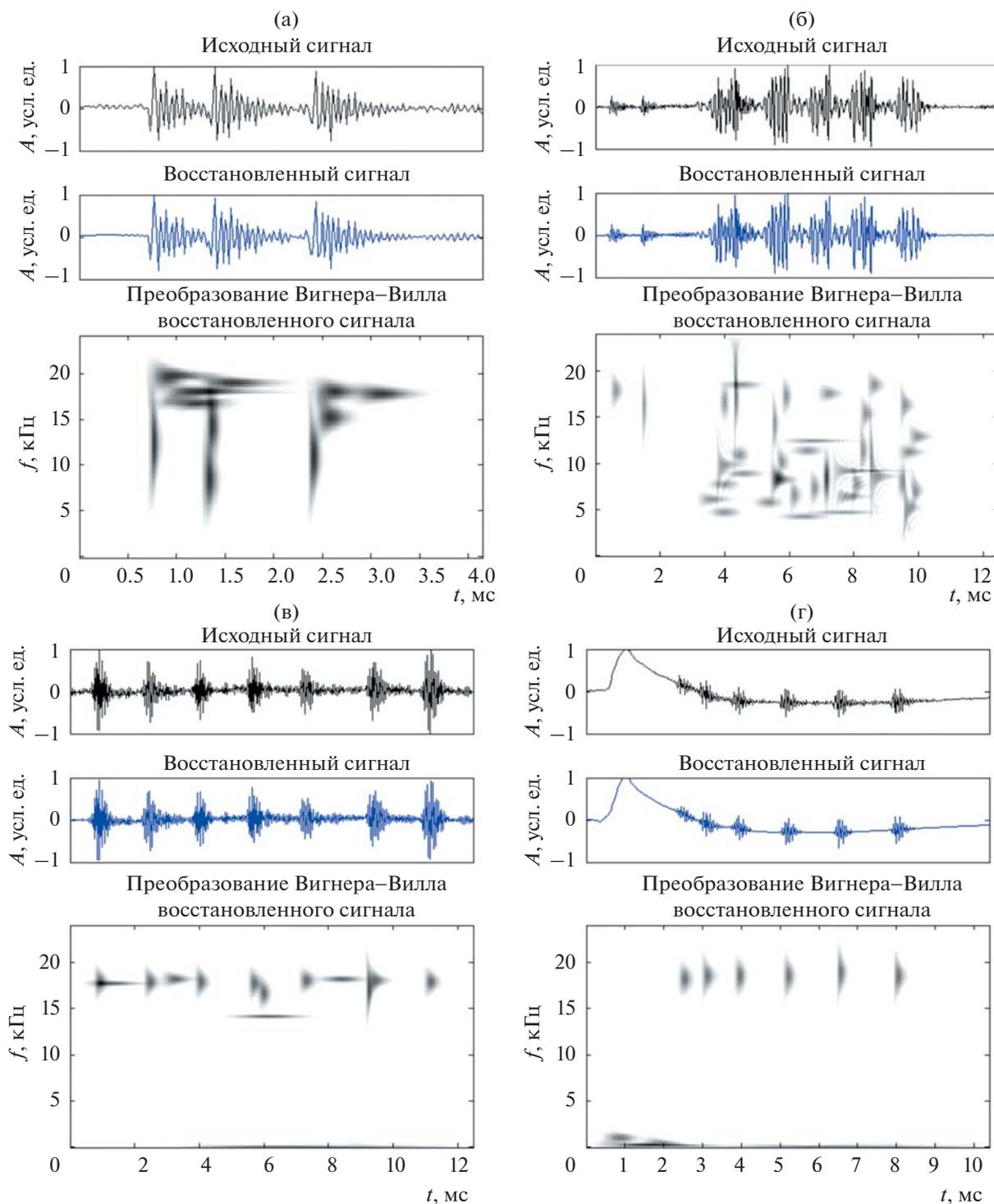


Рис. 4. Примеры частотно-временного анализа фрагментов сигнала, содержащих импульсы: (а) – сигнал с 3 импульсами (11 атомов, $ERR = 5\%$); (б) – сигнал с 7 импульсами (31 атом, $ERR = 5\%$); (в) – сигнал с 7 импульсами (14 атомов, $ERR = 5\%$); (г) – сигнал с 6 импульсами (10 атомов, $ERR = 1\%$).

увеличение количества импульсов с частотами 4–6 кГц и сокращение импульсов с частотами более 9 кГц [25]. В [26] показано, что за 30 мин до сильного землетрясения, произошедшего 25.03.2020 г. в 02:49 UT (магнитуда $M_W = 7.5$, ко-

ординаты эпицентра – 48.964° с.ш. 157.696° в.д., глубина – 57.8 км), наблюдалось резкое увеличение числа импульсов с частотами 2–3 кГц.

Для более детальной оценки изменения частотно-временного состава геоакустических им-

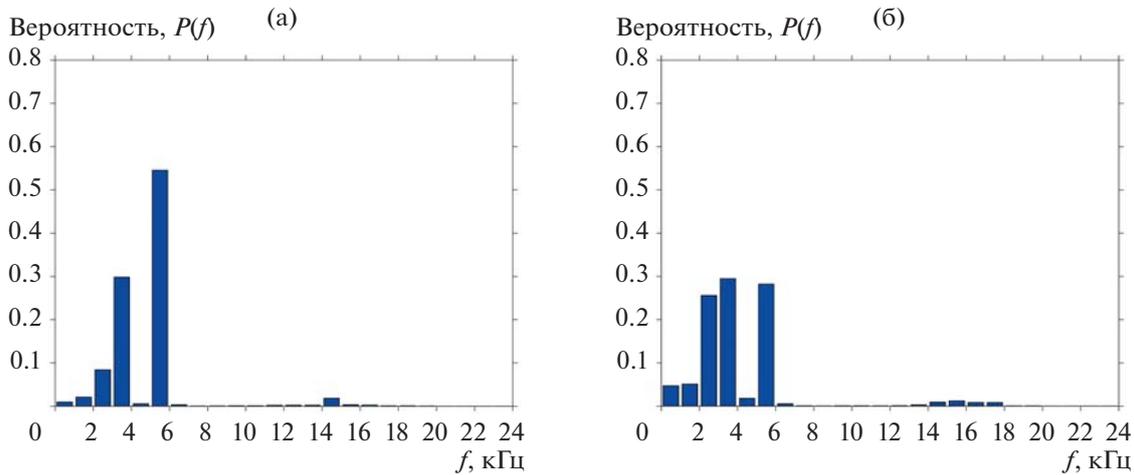


Рис. 5. Гистограммы частот, построенные для: (а) – предсейсмического геоакустического сигнала, зарегистрированного 20.03.2017 г. в 10:00–10:59 UT, (б) – сигнала, зарегистрированного в сейсмически спокойный период 02.05.2018 г. в 13:00–13:59 UT.

пульсов перед землетрясениями, произошедшими в 2017–2019 гг., была проанализирована структура сигналов, зарегистрированных в течение 15 сут до сейсмических событий, а также в сейсмически спокойные периоды. Исследования проводились в пункте наблюдений “Карымшина” на Камчатке (координаты 52.83° с.ш., 158.13° в.д.). Рассматривались все сейсмические события 2017–2019 гг. с магнитудами M_L более 6.0. Дальнейшему анализу подвергались данные перед землетрясениями, в случае попадания пункта наблюдений в зону их подготовки с радиусом Добровольского ($R_d = 10^{0.43M}$). Из сейсмических событий, разнесенных по времени менее чем на 15 сут,

в формируемую выборку включалось первое событие. В результате всего было выбрано 10 землетрясений с характеристиками, приведенными в табл. 1. Также были отобраны следующие сейсмически спокойные периоды (отсутствие в окрестности 15 дней землетрясений с магнитудой M_L выше 4.5): 07.11.2017 г. 20:00 – 10.11.2017 г. 17:59 UT, 26.04.2018 г. 00:00 – 06.05.2018 г. 15:59 UT, 14.01.2019 г. 20:00 – 15.01.2019 г. 12:59 UT, 29.03.2019 г. 00:00 – 30.03.2019 г. 23:59 UT.

Все данные обрабатывались следующим образом:

- удаление тренда, центрирование и нормирование сигнала;
- выделение информативных участков сигнала (импульсов) с помощью адаптивной пороговой схемы;
- обработка выделенных импульсов методом адаптивного согласованного преследования.

Далее строились гистограммы распределения частот базисной функции, входящей в разложение импульсов с наибольшим по абсолютной величине коэффициентом (самая энергоемкая компонента импульса). Анализ проводился для часовых интервалов сигнала. За аномалию принималось наличие явной доминирующей частоты заполнения импульсов f_{max} , т.е. ярко выраженного максимума гистограммы распределения частот (вероятность более 50%). В результате такие аномалии были выявлены перед четырьмя сейсмическими событиями (№ 1, 4, 5, 10, см. табл. 1). В сейсмически спокойные периоды подобных аномалий выявлено не было.

Для примера рассмотрим аномалию, выявленную в геоакустических данных перед землетрясением № 1 из табл. 1, произошедшим 29.03.2017 г. в 04:09:22 UT. На рис. 5а изображена гистограмма

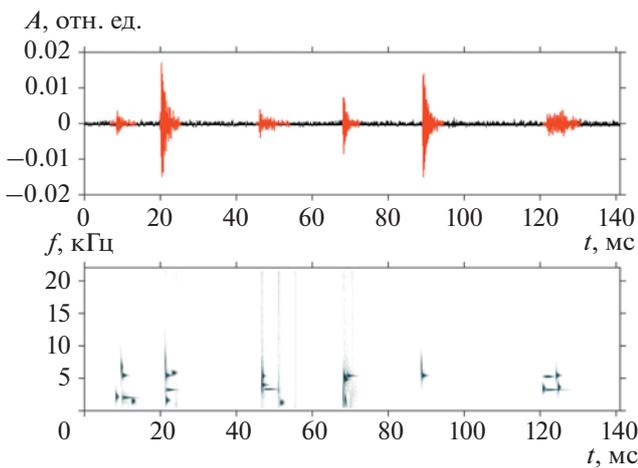


Рис. 6. Фрагмент записи предсейсмического сигнала, зарегистрированного 20.03.2017 г. в 10:00–10:59 UT, содержащий последовательность импульсов с частотами заполнения 5–6 кГц, и его частотно-временная структура (внизу).

распределения частот сигнала, зарегистрированного 20.03.2017 г. в 10:00–10:59 UT, а на рис. 5б – фонового сигнала, зарегистрированного 02.05.2018 г. в 13:00–13:59 UT. На рис. 5а присутствует аномальный пик, соответствующий частотам 5–6 кГц ($P(f) = 54\%$). На рис. 5б такие явные пики отсутствуют. На рис. 6 изображен фрагмент аномального геоакустического сигнала из рассмотренного временного периода, содержащий импульсы с частотой заполнения 5–6 кГц и его частотно-временная структура. Следует отметить, что результаты, полученные при выявлении аномалий в геоакустических данных, зарегистрированных перед землетрясениями № 1, 4, 5, 10, хорошо согласуются с результатами, представленными в [25, 26]. Значения f_{\max} при этом отличаются в данных перед каждым сейсмическим событием. С учетом того, что из 10 рассмотренных землетрясений в 6 случаях не выявлено возникновения аномалий частоты заполнения импульсов f_{\max} , для формулирования частотно-временных критериев возникновения предсейсмических аномалий в геоакустических данных требуются дальнейшие исследования с привлечением большего количества сейсмических событий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показаны результаты применения разработанного подхода на основе методов разреженной аппроксимации для частотно-временного анализа геоакустических данных. Его использование позволяет исследовать внутреннюю структуру геоакустических импульсов с различными характеристиками (высокочастотные, низкочастотные, сложной структуры). Приведены примеры частотно-временного анализа модельных и реальных геоакустических сигналов. Проанализированы геоакустические данные перед землетрясениями, произошедшими на Камчатке в 2017–2019 гг., с магнитудами M_L более 6.0. Показано, что в период до 15 дней перед четырьмя из десяти землетрясений выявляются аномалии в виде ярко выраженного максимума f_{\max} в частотах заполнения импульсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марапулец Ю.В., Шевцов Б.М. Мезомасштабная акустическая эмиссия. Владивосток: Дальнаука, 2012. 126 с.
2. Долгих Г.И., Купцов А.В., Ларионов И.А. Марапулец Ю.В., Швец В.А., Шевцов Б.М., Широков О.П., Чупин В.А., Яковенко С.В. Деформационные и акустические предвестники землетрясений // ДАН. 2007. Т. 413. № 1. С. 96–100.
3. Купцов А.В., Ларионов И.А., Шевцов Б.М. Особенности геоакустической эмиссии при подготовке Камчатских землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2005. № 5. С. 45–59.
4. Гордиенко В.А., Гордиенко Т.В., Купцов А.В., Ларионов И.А., Марапулец Ю.В., Рутенко А.Н., Шевцов Б.М. Геоакустическая локация областей подготовки землетрясений // ДАН. 2006. Т. 407. № 5. С. 669–672.
5. Гордиенко В.А., Гордиенко Т.В., Краснописцев Н.В., Купцов А.В., Ларионов И.А., Марапулец Ю.В., Рутенко А.Н., Шевцов Б.М. Аномалия высокочастотных сигналов геоакустической эмиссии как оперативный предвестник землетрясения // Акуст. журн. 2008. Т. 54. № 1. С. 97–109.
6. Шевцов Б.М., Марапулец Ю.В., Щербина А.О. О направленности приповерхностной высокочастотной геоакустической эмиссии в периоды деформационных возмущений // ДАН. 2010. Т. 430. № 1. С. 119–122.
7. Марапулец Ю.В., Щербина А.О. Оценка ориентации оси наибольшего сжатия пород с использованием точечной приемной системы на основе комбинированного приемника // Акуст. журн. 2018. Т. 64. № 6. С. 703–711.
8. Марапулец Ю.В., Щербина А.О. Методы исследования пространственной анизотропии геоакустической эмиссии // Эл. журнал “Техническая акустика”. 2008. Т. 14. С. 17. URL: <http://ejta.org/archive/articles2008/marapuletz1.zip> (дата обращения: 28.01.2021).
9. Марапулец Ю.В., Тристанов А.Б., Шевцов Б.М. Анализ структуры сигналов акустической эмиссии звукового диапазона методом разреженной аппроксимации // Акуст. журн. 2014. Т. 60. № 4. С. 396–406.
10. Марапулец Ю.В., Луковенкова О.О., Тристанов А.Б., Ким А.А. Методы регистрации и частотно-временного анализа сигналов геоакустической эмиссии. Владивосток: Дальнаука, 2017. 148 с.
11. Chakraborty A., Okaya D. Frequency-time decomposition of seismic data using wavelet-based methods // Geophysics. 1995. V. 60. № 6. P. 1906–1916. <https://doi.org/10.1190/1.1443922>
12. Josso N., Zhang J., Papandreou-Suppappola A., Ioana C., Mars J., Gervaise C., Stephan Y. On the characterization of time-scale underwater acoustic signals using matching pursuit decomposition // Proc. OCEANS 2009. 26–29 Oct. 2009. Biloxi, MTS, USA, 2009.
13. Гуань Янь, Ку Жень, Пейвен Ке. Адаптивная вейвлет-пакетная декомпозиция, основанная на алгоритме согласованного преследования, и ее применение в ультразвуковом контроле // Дефектоскопия. 2007. № 1. С. 80–87.
14. Ebenezer S.P., Papandreou-Suppappola A., Suppappola S.B. Classification of acoustic emissions using modified matching pursuit // EURASIP Journal on Applied Signal Processing. 2004. № 3. P. 347–357. <https://doi.org/10.1155/S1110865704311029>
15. Kovvali N., Das S., Chakraborty D., Cochran D., Papandreou-Suppappola A., Chattopadhyaya A. Time-frequency based classification of structural damage // Proc. 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. 23–26 Apr.

2007. P. 11.
<https://doi.org/10.2514/6.2007-2055>.
16. *Афанасьева А.А., Луковенкова О.О., Марапулец Ю.В., Тристанов А.Б.* Применение разреженной аппроксимации и методов кластеризации для описания структуры временных рядов акустической эмиссии // Цифровая обработка сигналов. 2013. № 2. С. 30–34.
 17. *Малла С.* Вейвлеты в обработке сигналов: учеб. пособие. 2-е издание, пер. с англ. М.: Мир, 2005. 671 с.
 18. *Tropp J.A.* Topics in Sparse Approximation: diss. PhD. Austin: The University of Texas, 2004. 232 p.
 19. *Артемьев А.Е.* Физические основы сейсморазведки: учеб. пособие. Саратов: ООО Издательский центр “Наука”, 2012. 56 с.
 20. *Mallat S., Zhang Z.* Matching pursuit with time-frequency dictionaries // IEEE Trans. Signal Processing. 1993. V. 41. № 12. P. 3397–3415.
<https://doi.org/10.1109/78.258082>
 21. *Луковенкова О.О., Тристанов А.Б.* Адаптивный алгоритм согласованного преследования с уточнением на смешанных словарях в анализе сигналов геоакустической эмиссии // Цифровая обработка сигналов. 2014. № 2. С. 54–57.
 22. *Tristanov A.B., Marapulets Yu.V., Lukovenkova O.O., Kim A.A.* A new approach to study of geoacoustic emission signals // Pattern Recognition and Image Analysis. 2016. V. 26. № 1. P. 34–44.
<https://doi.org/10.1134/S1054661816010259>
 23. *Андреев В.Г., Грамович В.В., Красикова М.В., Корольков А.И., Выборов О.Н., Данилов Н.М., Мартынюк Т.В., Родненков О.В., Руденко О.В.* Частотно-временной анализ звуков второго тона сердца для оценки давления в легочной артерии // Акуст. журн. 2020. Т. 66. № 5. С. 556–562.
 24. *Марапулец Ю.В.* Высокочастотный акустоэмиссионный эффект // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2015. № 1(10). С. 44–53.
 25. *Lukovenkova O., Solodchuk A., Tristanov A., Malkin E.* Complex analysis of pre-seismic geoacoustic and electromagnetic emission signals // E3S Web of Conferences. 2019. V. 127. P. 03001.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912703001>
 26. *Lukovenkova O., Solodchuk A.* Analysis of geoacoustic emission and electromagnetic radiation signals accompanying earthquake with magnitude $M_w = 7.5$ // E3S Web of Conferences. 2020. V. 196. P. 03001.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019603001>