УДК 51-72:534.6.08

doi: 10.30730/2541-8912.2018.2.4.409-418

Методика формирования Реестра геофизических сигналов на примере сигналов геоакустической эмиссии

© Ю. И. Сенкевич, О. О. Луковенкова, А. А. Солодчук*

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, с. Паратунка, Камчатский край, Россия *E-mail: aleksandra@ikir.ru

Описан новый системный подход к систематизации геофизических сигналов. Подход включает этапы выделения, анализа, объектного и структурного описания, классификации импульсов. Для выделения импульсов в сигналах геоакустической эмиссии предложен метод, основанный на вычислении адаптивного порога. Пороговое значение вычисляется на основе среднеквадратического отклонения сигнала и автоматически пересчитывается для каждого рассматриваемого участка сигнала. Выделенные импульсы предлагается анализировать с помощью методов разреженной аппроксимации. Изложена главная идея метода адаптивного согласованного преследования, позволяющего раскладывать выделенный импульс на базисные функции комбинированного словаря Гаусса–Берлаге с минимальными затратами пространственно-временных ресурсов и с требуемой точностью построенных аппроксимаций. Полученные разреженные представления импульсов описываются в рамках объектного подхода совокупностью характерных признаков, выделенных в ходе анализа, таких как количество функций в разложении, тип, параметры функций и др. Предложена классификация импульсов геоакустической эмиссии, полученная по результатам анализа большого объема реальных сигналов. Выделены четыре класса геоакустических импульсов. Объектное описание импульсов геоакустической эмиссии дополнено оригинальным структурным описанием, построенным на основе отношений локальных экстремумов импульса. Это позволило существенно сократить разнообразие форм импульсов для их дальнейшей идентификации. Результаты, полученные в ходе применения описанного системного подхода к анализу геоакустических сигналов, обобщены в виде Реестра геофизических сигналов.

Ключевые слова: реестр геофизических сигналов, систематизация геофизических сигналов, объектное описание импульсов, выделение информативных признаков, системный подход.

Method to form a geophysical signals catalog based on geoacoustic emission signals

Yury I. Senkevich, Olga O. Lukovenkova, Alexandra A. Solodchuk*

Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, FEB RAS, Paratunka, Kamchatka Region, Russia *E-mail: aleksandra@ikir.ru

The article is devoted to a new approach to the systematization of geophysical signals. The system approach is described. It includes stages of detection, analysis, object and structural description, classification of pulses. A method based on the adaptive threshold calculation is proposed for pulse detection in geoacoustic emission signals. The threshold value is calculated using the signal standard deviation and automatically recalculated for each considered part of the signal. The authors propose to analyze the detected pulses using sparse approximation methods. The article describes the main idea of the adaptive matching pursuit. This method allows to decompose the pulse into the basis functions of the combined Gauss–Berlage dictionary with minimum spatial and temporal costs and with the required accuracy of the

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 18-11-00087).

constructed approximations. Obtained sparse representations are described under the objective approach as combination of informative features identified during the analysis, for example, the number of functions in the decomposition, parameters of functions, etc. The authors propose a classification of the geoacoustic emission pulses obtained from the results of real signals analysis. Four classes of geoacoustic pulses are defined. The object description of geoacoustic emission pulses is supplemented by an original structural description based on the relations of pulse local extremums. That makes it possible to significantly reduce the variety of pulse shapes for their further identification.

The results obtained during the application of the described system approach to the analysis of geoacoustic signals are summarized in the Geophysical Signals Catalog.

Keywords: geophysical signals catalog, systematization of geophysical signals, object description of pulses, definition of informative features, system approach.

Введение

Систематизация геофизических сигналов является составной частью системного подхода к обработке данных геофизических наблюдений в целом. Многообразие методов и форм получения и представления геофизической информации регламентируется законодательной базой метрологического обеспечения. При накоплении данных должны выполняться требования, нормы и правила используемых моделей измерения в соответствии с установленными стандартизованными методами. Часто исследователи сталкиваются с необхолимостью создания новых методов и методик изучения природных объектов и явлений, что заставляет прибегать к разработке специфических форм измерений и согласованию их с известными стандартами. В результате за многие годы проведенных наблюдений порождаются огромные электронные хранилища данных, которые чаще всего остаются малодоступными для широкой научной и инженерной аудитории по причине отсутствия подготовленных стандартов и форматов хранения и прочтения этих данных.

В связи с этим в лаборатории акустических исследований Института космофизических исследований и распространения радиоволн (ИКИР) ДВО РАН было принято решение унифицировать накопленные за время многолетних наблюдений (2001–2018) данные. Начальным звеном этой научно-технической работы стала систематизация разнородных импульсных геофизических сигналов. На основе результатов ранее проведенных исследований [Ларионов, 2005; Кузнецов и др., 2009; Christine, 2014; Рабинович и др., 2014; Пулинец и др., 2015; Filonenko, 2010; Mishchenko, 2016; Тристанов и др., 2016; Уваров, 2016; Рябова, Спивак, 2017; Senkevich et al., 2017] авторами предложено применение системного подхода к изучению и описанию геофизических импульсов, а также формированию Реестра геофизических сигналов (далее Реестр). Для его реализации на первом этапе использован имеющийся научный задел и опыт сигналов геоакустической исследования эмиссии (ГАЭ) [Купцов, 2005; Gregori et al., 2010; Мищенко, 2011; Марапулец, Шевцов, 2012; Афанасьева и др., 2013; Marapulets et al., 2016; Марапулец и др., 2017; Tristanov et al., 2016]. Таким образом, целью проводимых на данной стадии научно-технических работ явилась систематизация и классификация импульсов ГАЭ на основе системного подхода к изучению и описанию разнообразия форм (паттернов) этих импульсов.

Процесс описания геофизических сигналов можно разбить на три этапа: выделение участков сигнала, содержащих полезные данные; анализ внутренней частотно-временной структуры сигналов с последующим выявлением характерных признаков; классификация сигналов.

Методы и алгоритмы обработки и анализа данных

Для выделения одиночных импульсов в сигналах геоакустической эмиссии был разработан алгоритм, основанный на использовании адаптивного порога, вычисляемого с помощью среднеквадратического отклонения (СКО) [Kim et al., 2017]. Расчет пороговых значений ведется в непересекающихся окнах фиксированной длины *n* по формуле

$$S_k = S_{k-1} + A \cdot (\sigma_{k-1} - \sigma_{k-2}),$$

где S_k – пороговое значение в окне от $k \cdot n$ -го до $(k+1) \cdot n$ –1-го отсчета, σ_k – СКО, вычисленное в окне $k \cdot n$ -го до $(k+1) \cdot n$ –1-го отсчета, A – экспериментально определяемый параметр. Поскольку вычисляемый порог должен зависеть лишь от уровня фонового шума, предлагается не включать в процесс вычисления пороговой функции участки сигнала, содержащие импульсы. Для определения границ импульса сигнал просматривается скользящим окном длиной Δ в прямом и обратном направлениях, начиная с точки его пересечения с порогом. Регистрация начала и конца импульса производится в момент, когда все отсчеты в окне Δ окажутся меньше заданного значения S_0 :

$$S_0 = B \cdot \sigma_{\Delta},$$

где σ_{Δ} – СКО на данном участке сигнала, *B* – экспериментально определяемый параметр. Длина окна Δ также определяется экспериментально.

Для выделенных импульсов предлагается провести предварительную обработку, заключающуюся в нормировании и центрировании сигналов, и анализ с использованием методов разреженной аппроксимации.

Решение задачи разреженной аппроксимации предполагает представление сигнала s(t) в виде линейной комбинации минимально возможного числа функций $g_m(t)$ из предварительно подобранного базиса (словаря).

$$s(t) = \sum_{m=1}^{N} c_m g_m(t),$$
 где $\left\| \mathbf{c} \right\|_0 \to \min,$ (1)

где с – вектор коэффициентов разложения.

Геоакустические импульсы представляют собой аддитивные сигналы, образующиеся наложением элементарных моночастотных импульсов друг на друга. Поэтому разреженное представление является подходящим описанием для типовых геоакустических сигналов.

Точность и разреженность аппроксимаций напрямую зависит от выбранного словаря функций. Для анализа сигналов ГАЭ подходит словарь, составленный из модулированных и сдвинутых функций Гаусса и Берлаге.

Импульс Гаусса задается аналитическим выражением

$$g(t) = A \cdot \exp\left(-B(t_{end}) \cdot \Delta \cdot t^2\right) \cdot \sin(2\pi f t),$$

где A – амплитуда, выбирается таким образом, чтобы $||g(t)||_2 = 1$; t_{end} – длина атома; f – частота от 200 до 20 000 Гц (диапазон регистрируемых частот); $B(t_{end})$ – предельное значение параметра B, вычисляемое по формуле

$$B(t_{end}) = -\frac{4 \cdot \ln 0.05}{t_{end}^{2}}$$

 Δ – коэффициент варьирования параметра *В* относительно предельного значения.

Импульс Берлаге задается аналитическим выражением

$$g(t) = A \cdot t^{n(p_{max}) \cdot \Delta} \cdot \exp\left(-\frac{n(p_{max}) \cdot \Delta}{p_{max} \cdot t_{end}} \cdot t\right) \cdot \cos\left(2\pi f t + \frac{\pi}{2}\right),$$

где A – амплитуда, выбирается таким образом, чтобы $||g(t)||_2 = 1$; t_{end} – длина атома; p_{max} – положение максимума относительно длины атома, $p_{max} \in [0.01, 0.4]$; f – частота от 200 до 20 000 Гц; $n(p_{max})$ – предельное значение параметра n, вычисляемое по формуле

$$n(p_{max}) = \frac{\ln 0.05}{\ln \frac{1}{p_{max}} - \frac{1}{p_{max}} + 1}$$

 Δ – коэффициент варьирования параметра *n* относительно предельного значения.

Задача разреженной аппроксимации (1) неразрешима за полиномиальное время. Алгоритм точного решения требует полного перебора всех возможных комбинаций функций из словаря, т.е. имеет факториальную сложность O(N!). Одним из наиболее часто используемых алгоритмов приближенного решения задачи разреженной аппроксимации является алгоритм согласованного преследования (Matching Pursuit, MP). Данный алгоритм был предложен в [Mallat, Zhang, 1993]. Алгоритм можно описать в виде следующей итерационной процедуры:

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

где R(t) – невязка, τ – сдвиг функции g(t) относительно сигнала s(t).

К сожалению, у алгоритма согласованного преследования имеется ряд существенных недостатков. Во-первых, для обеспечения достаточной точности разложений требуется использование словарей больших размеров, что в свою очередь вызывает степенной рост скорости выполнения алгоритма. Во-вторых, поскольку выбор функций осуществляется из неизменяющегося словаря, полученные разложения отличаются «грубой» дискретизацией в пространстве параметров. Для решения вышеперечисленных проблем авторами было предложено улучшить классический алгоритм таким образом, чтобы на словарях ограниченного размера можно было строить разложения требуемой точности. Поскольку на каждой итерации алгоритма определяются параметры функции, имеющей наибольшее скалярное произведение с сигналом, то итерацию согласованного преследования можно описать в виде задачи поиска максимума функции многих переменных:

 $F(\tau,\mathbf{p}) = \langle s(t), g(t-\tau,\mathbf{p}) \rangle \rightarrow \max_{\mathbf{p}}$.

Главная идея предлагаемых улучшений – применять методы оптимизации для уточнения параметров **р** функции, имеющей максимальное скалярное произведение с сигналом. Разработанный алгоритм был назван «адаптивное согласованное преследование» (Adaptive Matching Pursuit, AMP) [Афанасьева и др., 2013; Луковенкова, Тристанов, 2014; Tristanov et al., 2016].

Таким образом, в результате проведенного анализа в рамках объектного подхода каждый сигнал может быть представлен объектом со следующими атрибутами, отражающими характерные признаки сигнала:

1. Длина (в отсч.).

2. Дата и время регистрации сигнала (с точностью до мс).

3. Количество функций, входящих в состав импульса N.

4. Итоговая ошибка (в %), вычисляется по формуле: $ERR_{N} = ||\mathbf{R}_{N}||/||s(t)|| \times 100$ %.

Для каждой функции приводятся: а. тип (Берлаге или Гаусс);

b. сдвиг τ (в отсч., если отрицательное значе-

ние, то функция смещена относительно импульса влево);

с. базовая длина (максимально возможная длина функций, относительно нее рассчитываются длина и положение максимума);

d. длина t_{end} (в % относительно базовой длины (с));

е. положение максимума для функций Берлаге *p*_{*max*} (в % относительно длины (d));

f. частота заполняющей гармоники f (в Гц); g. коэффициент варьирования Δ (влияет на крутизну огибающей функции: чем больше значение, тем огибающая круче).

Для автоматизации процесса выделения характерных признаков геоакустических импульсов использовался программный комплекс «MP Complex», состоящий из четырех подсистем: подсистемы генерации словарей, Dictionary Constructor; подсистемы анализа сигналов, MP Analyzer; подсистем визуализации MP Visualisator и SIG View [Луковенкова, Тристанов, 2015].

В ходе анализа большого объема данных авторами выделены четыре класса геоакустических импульсов.

Класс 1. Простые (моночастотные). Разреженное представление в частотно-временной области представляет собой горизонтальную линию, состоящую из частотно-временных представлений отдельных функций. В состав импульса может входить одна функция (рис. 1а) или несколько (рис. 1б). Встречаются моночастотные импульсы с различной несущей частотой.

Класс 2. Составляющие импульс функции состоят из одного-двух колебаний. Разреженное представление импульса в частотновременной области представляет собой несколько параллельных вертикальных линий (рис. 2). Следовательно, импульс не может быть описан функцией, содержащей большое количество периодов, и описывается квазипериодической последовательностью коротких возбуждений.

Класс 3. Сложные (поличастотные). Для таких импульсов в частотно-временной области определяются несколько параллельных горизонтальных линий (рис. 3), при этом частоты могут быть визуально неразличимы во временной форме. К этому же классу можно отнести импульсы с визуально различимыми частотами, при этом либо функции накладываются друг на друга (рис. 4а), либо в пределах одного импульса осуществляется переход от низкой частоты к высокой (или наоборот) (рис. 4б).

Класс 4. Реальные сигналы представляют собой комбинацию простых классов (рис. 5).

Приведенное выше объектное и частотно-временное описание импульсов ГАЭ было решено дополнить оригинальным описанием амплитудно-фазовой структуры на основе отношений локальных экстремумов импульса. Такой подход позволит представить сигнал в рамках замкнутого множества без использования пороговых значений уровней квантова-

ния амплитуды и периода дискретизации, возникающих в процессе оцифровки аналогового сигнала. Повышение точности измерений требует увеличения указанных характеристик оцифровки и порождает комбинаторно зависимое разнообразие допустимых значений сигнала. Избежать такой ситуации возможно, если трансформировать сигнал в последовательность его локальных экстремумов и интервалов между ними. Такое преобразование не кажется критическим, если значения сигнала между его соседними локальными экстремумами можно не учитывать, что вполне оправдано на практике измерений большинства натурных сигналов. Сущность преобразования продемонстрирована на рис. 6.



Рис. 1. Представители класса 1: импульсы, раскладывающиеся на одну базисную функцию (а) и на три базисные функции (б). Здесь и далее на рисунках: *А* – амплитуда сигнала в условных единицах, *f* – частота в кГц.



Рис. 2. Представители класса 2: импульсы, раскладывающиеся на пять коротких базисных функций (а) и на четыре базисные функции (б).



Рис. 3. Представители класса 3 с визуально неразличимыми частотами во временной форме: импульс, раскладывающийся на четыре базисных функции разной частоты от 3 до 15 кГц (а) и на пять базисных функций разной частоты от 5 до 15 кГц (б).



Рис. 4. Представители класса 3 с визуально различимыми частотами во временной форме: импульс, раскладывающийся на несколько базисных функций с широким частотным разнесением отдельных составляющих (а) и на сложную комбинацию базисных функций с заметным разнесением по частоте и временными сдвигами (б).



Рис. 5. Примеры (а) и (б) разложений импульсов, отнесенных к классу 4.



Рис. 6. Пример описания оцифрованного сигнала значениями локальных экстремумов и интервалов между ними.

Имеем исходное множество последовательных значений локальных экстремумов $\{x_i\}$, где i = 1, N. Дополним это множество еще одним множеством с последовательными значениями интервалов времени $\{\tau_i\}$, где i = 1, N-1, между локальными экстремумами. Вычислим отношения для каждого из экстремумов следующим образом:

$$r_{i,i+m} = \begin{cases} 1, x_i > x_{i+m} \\ 0, x_i \le x_{i+m} \end{cases}, \quad \omega_{i,i+m} = \begin{cases} 1, \tau_i > \tau_{i+m} \\ 0, \tau_i \le \tau_{i+m} \end{cases}, \\ m = 1...M(M \le N - i), \quad (2) \end{cases}$$

где $r_{i,i+m}$ – результат логического сравнения *i*-го и *i*+*m*-го значений амплитуд экстремумов; $t_{i,i+m}$ – результат логического сравнения *i*-го и *i*+*m*-го значений интервалов между экстремумами. Упорядочим ряды таких отношений в виде квадратных матриц для *M*-отношений $r_{i,i}$ и $\omega_{i,i}$. Полученные матрицы имеют диагональную симметрию в силу алгебраического свойства симметрии неравенств (если a > b, то b < a) и в этом смысле являются избыточными, поэтому в дальнейшем будем использовать только половины каждой из построенных матриц.

Матрицы (3) и (4) представляют код выбранного (*i*-го) экстремума в сигнале, характеризующий его амплитудное и временное положение по отношению к следующим за ним М-экстремумам. Как следствие применения правил отношения (2), преобразование фрагмента сигнала из М-экстремумов в матрицы (3) и (4) обладает свойством инвариантности к операциям смещения, а также амплитудного и временного транспонирования исходного сигнала. Полученное важное свойство нечувствительности к смещению матрицы вытекает из основного свойства неравенств: если a > b, то a + c > bb + c при любом c - для операции смещения сигнала во времени, и если a > b и c > 0, то ac > bc - для операции транспонирования сигнала. В результате каждой полученной паре матриц (3) и (4) можно сопоставить некоторый графический инвариант формы сигнала (паттерн). Такое описание дает информацию о структуре сигнала в отношениях его экстремумов.

Используя представленное преобразование, можно выполнить описание любого фрагмента сигнала. Пример такого структурного описания представлен на рис. 7.

$$\mathbf{R}_{i} = \begin{pmatrix} r_{i,i} & r_{i,i+1} & \cdots & r_{i,i+(M-2)} & r_{i,i+(M-1)} \\ r_{i+1,i} & r_{i+1,i+1} & & r_{i+1,i+(M-1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{i+(M-2),i} & r_{i+(M-2),i+(M-2)} & r_{i+(M-2),i+(M-1)} \\ r_{i+(M-1),i} & r_{i+(M-2),i+1} & \cdots & r_{i+(M-1),i+(M-2)} & r_{i+(M-1),i+(M-1)} \end{pmatrix},$$
(3)
$$\mathbf{W}_{i} = \begin{pmatrix} \omega_{i,i} & \omega_{i,i+1} & \cdots & \omega_{i,i+(M-2)} & \omega_{i,i+(M-1)} \\ \omega_{i+1,i} & \omega_{i+1,i+1} & & \omega_{i+1,i+(M-1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega_{i+(M-2),i} & \omega_{i+(M-2),i+(M-2)} & \omega_{i+(M-2),i+(M-1)} \\ \omega_{i+(M-1),i} & \omega_{i+(M-2),i+1} & \cdots & \omega_{i+(M-1),i+(M-2)} & \omega_{i+(M-1),i+(M-1)} \end{pmatrix}.$$
(4)

Геосистемы переходных зон, 2018, т. 2, № 4, с. 409–418



Рис. 7. Пример структурного описания фрагмента сигнала. Вверху слева показан эпизод оцифрованного сигнала с выделенным фрагментом; справа –матрица отношений выделенного фрагмента в символах «больше», «меньше», «равно»; внизу слева – паттерн выделенного фрагмента, построенный на основании матрицы отношений.



019 crp: > < > > > > > > | = < < = < < < = > = < < > < < < =

020 crp: < < < > < < < | < > < < > < < = > < = < < < < <

Параметр	Значение
Длина (отсч.)	61
Дата/время	$03.04.2016 \ 13:01:11.082$
Количество атомов	4
Итоговая ошибка	4.22 %

2 атом	Берлаге
Позиция	11
Коэффициент	0.527
Базовая длина (отсч.)	100
Частота f	15943.750 Гц
Длина T_{end}	96.67 %
Положение max t_{max}	1.60 %
Коэф. варьирования Δ	5.975
4 атом	Берлаге
4 атом Позиция	Берлаге 19
4 атом Позиция Коэффициент	Берлаге 19 -0.376
4 атом Позиция Коэффициент Базовая длина (отсч.)	Берлаге 19 -0.376 100
4 атом Позиция Коэффициент Базовая длина (отсч.) Частота f	Берлаге 19 -0.376 100 1987.500 Гц
4 атом Позиция Коэффициент Базовая длина (отсч.) Частота f Длина T _{end}	Берлаге 19 -0.376 100 1987.500 Гц 80.00 %
4 атом Позиция Коэффициент Базовая длина (отсч.) Частота f Длина T_{end} Положение max t_{max}	Берлаге 19 -0.376 100 1987.500 Гц 80.00 % 14.29 %

Рис. 8. Описание геоакустического импульса, хранящегося в Реестре геофизических сигналов.

Результаты

Представленный подход использовался для структурного описания импульсов ГАЭ для последующего включения этого описания в Реестр. Для автоматизации процесса описания множества импульсов, включенных в Реестр, была написана компьютерная программа «Registry». Число включенных импульсов составило 40 284.

В процессе реализации описанного объектного подхода к описанию результатов измерений ГАЭ были получены уникальные сведения о разнообразии, специфике и характеристиках импульсов геоакустических сигналов приповерхностных пород.

В качестве примера на рис. 8 представлено описание одного из геоакустических импульсов, хранящихся в Реестре.

Выводы

1. На основе разработанного объектного описания импульсов с использованием разложения в комбинированном словаре функций Гаусса–Берлаге выполнено разложение анализируемых импульсов на базисные функции с высокой точностью.

2. Благодаря разработанному формату представления характеристик импульсов в виде унифицированного шаблона продемонстрирована возможность наглядного и интуитивно понятного описания множества импульсов ГАЭ, их автоматизированного поиска и сортировки по заданному набору полей шаблона.

3. С помощью структурного описания выделенных импульсов в виде специфических матриц-образов наглядно представлена исчислимость бесконечного разнообразия геоакустических импульсов.

4. В результате обработки сигналов геоакустической эмиссии с использованием разработанных шаблонов создана база объектов для их дальнейшего аналитического разбора по классам на основании привязки семантической информации и выделения групповых свойств.

5. В конечном итоге, на основе систематизации объектов по характеристическим признакам и применения современного объектного подхода к представлению данных сформирован Реестр геофизических сигналов.

Список литературы

1. 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.

2. Кузнецов Ю.В., Баев А.Б., Бехтин М.А., Сергеев А.А. Корреляционный метод обнаружения информационных составляющих побочных электромагнитных излучений технических средств // *Технология ЭМС*. 2009. № 2 (29). С. 2–13.

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. Ларионов И.А., Щербина А.О., Мищенко М.А. Отклик геоакустической эмиссии на процесс подготовки землетрясений в разных пунктах наблюдений // Вестн. КРАУНЦ. Серия Науки о Земле. 2005. № 2 (6). С. 108–115.

5. 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.

6. Луковенкова О.О., Тристанов А.Б. Программа для визуализации результатов разреженной аппроксимации сигналов геоакустической эмиссии MP Complex ver 1.0: свид-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2015617250. 29.09.2015.

7. 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.

8. Марапулец Ю.В., Шевцов Б.М. *Мезомасштабная акустическая эмиссия*. Владивосток: Дальнаука, 2012. 126 с.

9. Мищенко М.А. Статистический анализ возмущений геоакустической эмиссии, предшествующих сильным землетрясениям на Камчатке // *Вестн. КРАУНЦ. Физ.-мат. науки.* 2011. № 1 (2). С. 56–64.

10. Пулинец С.А., Узунов Д.П., Карелин А.В., Давиденко Д.В. Физические основы генерации краткосрочных предвестников землетрясений. Комплексная модель геофизических процессов в системе литосфера–атмосфера–ионосфера–магнитосфера, инициируемых ионизацией // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2015. Т. 55. № 4. С. 1–19. https://doi.org/10.7868/ S0016794015040136 [Pulinets S.A., Ouzounov D.P., Karelin A.V., Davidenko D.V. Physical bases of the generation of short-term earthquake precursors: A complex model of ionization-induced geophysical processes in the lithosphere-atmosphere-ionosphere-magnetosphere system. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2015, 55(4): 521-538. https://doi.org/10.1134/s0016793215040131] 11. Рабинович Е.В., Ганчин К.С., Пупышев И.М., Шефель Г.С. Модель сейсмического импульса, возникающего при гидравлическом разрыве пласта // *Математические структуры и моделирование*. 2014. № 4 (32). С. 105–111.

12. Рябова С.А., Спивак А.А. Возмущение сейсмического фона геомагнитными импульсами // *Геофизические исследования*. 2017. Т. 18. № 2. С. 65–76. https://doi.org/10.21455/gr2017.2-4

13. Тристанов А.Б., Луковенкова О.О., Поляков Р.К. Модель временного ряда для задач анализа темпоральных объектов // Морские интеллектуальные технологии. 2016. Т. 2. № 4 (34). С. 46–50.

14. Уваров В.Н. Методы выделения электромагнитных сигналов литосферного происхождения // Вестн. КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2016. № 3 (14). С. 91–97. https://doi.org/10.18454/2079-6641-2016-14-3-91-97

15. Christine E. Estimation of soil properties using waveforms of seismic surface waves: patent US8892410B2. 18.11.2014.

16. Filonenko S., Nimchenko T., Kosmach A. Model of acoustic emission signal at the prevailing mechanism of composite material mechanical destruction // *Aviation*. 2010. N 14 (4). P. 95–103. https://doi.org/10.3846/ aviation.2010.15

17. Gregori G.P., Poscolieri M., Paparo G., De Simone S., Rafanelli C., Ventrice G. «Storms of crustal stress» and AE earthquake precursors // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2010. N 10 (2). P. 319–337. https://doi.org/10.5194/nhess-10-319-2010

18. Kim A.A., Lukovenkova O.O., Marapulets Yu.V., Tristanov A.B. Parallel computations for real time implementation of adaptive sparse approximation methods // 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), 24–26 May 2017. IEEE, 2017. https://doi.org/10.1109/SCM.2017.7970567

19. Mallat S., Zhang Z. Matching pursuits with timefrequency dictionaries // *IEEE Transactions on Signal Processing*. 1993. Vol. 41, N 12. P. 3397–3415. https:// doi.org/10.1109/78.258082

20. Marapulets Yu., Solodchuk A., Shcherbina A. Changes of geoacoustic emission directivity at «Mikizha» site associated with earthquakes in Kamchatka // *E3S Web of Conferences*. 2016. Vol. 11, 00014. 5 p. https://doi. org/10.1051/e3sconf/20161100014.

21. Mishchenko M. Statistics of occurrence of pre-seismic anomalies in geoacoustic emission and in atmospheric field // *E3S Web of Conferences*.2016. Vol. 11, 00015. 4 p. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20161100015

22. Senkevich Yu.I., Duke V.A., Mishchenko M.A., Solodchuk A.A. Information approach to the analysis of acoustic and electromagnetic signals // *E3S Web of Conferences*. 2017. Vol. 20, 02012. 9 p. https://doi. org/10.1051/e3sconf/20172002012

23. 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. Vol. 26, N 1. P. 34–44. https://doi. org/10.1134/S1054661816010259

Сведения об авторах

СЕНКЕВИЧ Юрий Игоревич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, ЛУКОВЕНКОВА Ольга Олеговна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, СОЛОДЧУК Александра Андреевна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник – лаборатория акустических исследований, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, с. Паратунка, Камчатский край.