

2. *Иваницкий В. П., Вознюк П. О., Легкова Г. В., Литовченко А. С.* Кинетика окислительно-восстановительных реакций железа в структурах кальций-натриевых амфиболов, подвергнутых воздействию радиационных и тепловых полей // *Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии*. Зб. наук. праць. Т. 2; вип. 1. – Київ: ВД “Академперіодика”, 2004. – С. 315–337.
3. *Иваницкий В. П., Литовченко А. С., Бондаренко Г. М. та ін.* Кинетика радіаційно-хімічного окиснення заліза в структурах гасингситів // *Мінерал. журн.* – 2007. – **29**, № 4. – С. 58–66.
4. *Литвин А. Л., Иваницкий В. П., Остапенко С. С.* Влияние радиационного и термического воздействия на структуру железосодержащего Са-амфибола // *Там же.* – 1994. – **16**, № 1. – С. 75–84.
5. *Литвин А. Л.* Кристаллохимия и структурный типоморфизм амфиболов. – Киев: Наук. думка, 1977. – 236 с.
6. *Vancroft G. M.* Quantitative estimates of site populations in an amphibole by the Mossbauer effect // *Phys. Lett. A.* – 1967. – **26**, No 1. – P. 17–18.
7. *Иваницкий В. П., Калинин А. М., Матяш И. В. и др.* Распределение ионов железа в структуре роговых обманок по данным ЯГР и ПМР // *Там же.* – 1980. – **2**, № 5. – С. 34–39.
8. *Канепит В. Н., Нозик Ю. З.* Распределение катионов в кристаллической структуре арфведсонита по данным дифракции нейтронов // *Геохимия.* – 1982. – № 10. – С. 1523–1525.
9. *Adisson W. E., Sharp J. H.* A mechanism for the oxidation of ferrous iron in hydroxylated silicates // *Clay Miner. Bull.* – 1962. – **5**, No 1. – P. 73–79.
10. *Латидес И. Л., Коваленко В. И., Брандт С. Б.* Термические эффекты в щелочных амфиболах // *Экспериментальное исследование минералообразования.* – Москва: Наука, 1971. – Т. 1. – С. 91–95.
11. *Латидес И. Л., Валетов Т. А.* Упорядоченность катионов в амфиболах. – Москва: Наука, 1986. – 124 с.

*Інститут геохімії, мінералогії
та рудотворення НАН України, Київ*

Надійшло до редакції 10.05.2007

УДК 550.834

© 2007

В. С. Мостовой

Оптимальные оценки параметров микросейсмического фона

(Представлено академиком НАН Украины В. И. Старостенко)

The structural analysis and identification of the dynamic parameters of structures, whose spectral characteristics occupy the seismic and lower parts of acoustic spectral bands are the extremely important themes in models of the monitoring of such structures with the purpose of a prediction of essential changes in dynamic characteristics. From the point of view of geometric sizes, these objects are large man-made or natural geological objects. The method of dynamic identification provides an opportunity to investigate the behaviour of a structure by means of non-destructive tests, allows estimating „the health” of this structure and a possible requirement for more detailed monitoring. The article gives a methodology for the identification of main structural parameters, such as the main eigenfrequencies and the Q-factor of a structure on these frequencies.

Пассивный мониторинг представляет интерес для объектов с источниками эмиссионных сигналов, таких как геологические разломы, являющиеся источниками эмиссии сейсмических сигналов [1–3], параметры которых подлежат определению и являются характеристикой структуры [4]. При оценке параметров модели пассивного мониторинга в геофизических

исследованиях мы сталкиваемся с таким представлением модели наблюдаемых геофизических полей $y(t, x)$, когда наблюдения осложнены аддитивной помехой $n(t, x)$ (t — временная, а x — пространственная координаты), последняя в зависимости от организации системы наблюдений может быть одномерной (профильные наблюдения), двумерной и трехмерной либо же примем одно единственное значение. Собственно модель процесса формирования поля $M(\alpha, t, x)$ определяется вектором свободных параметров модели α , а сама модель является гипотезой исследователя о моделируемом процессе. Итак, представим модель

$$y(t, x) = M(\alpha, t, x) + n(t, x), \quad (1)$$

где $n(t, x)$ — аддитивная помеха. Размерность вектора α в основном тоже подлежит определению.

Для вычисленных оптимальных значений α (из множества A допустимых его значений) оценивается норма близости модели к наблюдаемым данным. Если она не превосходит установленный исследователем порог, то принимается решение об адекватности гипотетической модели $M(\alpha, t, x)$ процессу $y(t, x)$:

$$\min_{\alpha \in A} [(y(t, x) - M(\alpha, t, x), y - M(\alpha, t, x))]. \quad (2)$$

Такой подход используется давно [5], но остается актуальным в геофизике и в настоящее время [6].

Минимум в выражении (2), достигается в точке α , которая удовлетворяет следующему уравнению:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(y(t, x) - M(\alpha, t, x), y(t, x) - M(\alpha, t, x))}{\partial \alpha} = 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow \left(\frac{\partial M(\alpha, t, x)}{\alpha}, M(\alpha, t, x) \right) - \left(\frac{\partial M(\alpha, t, x)}{\partial \alpha}, y(t, x) \right) = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

В (3) под выражением $\partial M(\alpha, t, x) / \partial \alpha$ нужно понимать вектор столбец (T — символ транспонирования):

$$\left(\frac{\partial M(\alpha, t, x)}{\partial \alpha} \right)^T = \left\{ \frac{\partial M(\alpha, t, x)}{\partial \alpha_1}, \dots, \frac{\partial M(\alpha, t, x)}{\partial \alpha_n} \right\}. \quad (4)$$

В результате мы получили систему уравнений для определения вектора α .

$$\left(\frac{\partial M(\alpha, t, x)}{\partial \alpha_i}, M(\alpha, t, x) \right) = \left(\frac{\partial M(\alpha, t, x)}{\partial \alpha_i}, y(t, x) \right); \quad \overline{i = 1, n}. \quad (5)$$

Оптимизированную процедуру оценки динамических параметров объекта с характеристиками в области сейсмического диапазона частот проиллюстрируем обработкой полевых наблюдений, полученных на техногенном объекте колонного типа, что дает возможность проследить волновой характер распространения динамических возмущений по объекту. Данные, полученные в пассивном мониторинге на объекте, представляют собой записи скорости осцилляций объекта в точке с соответствующими координатами. Наши наблюдаемые данные — это запись ускорений осциллирующего объекта длиной в 15.18 с.

На рис. 1 представлен этот фрагмент записи.

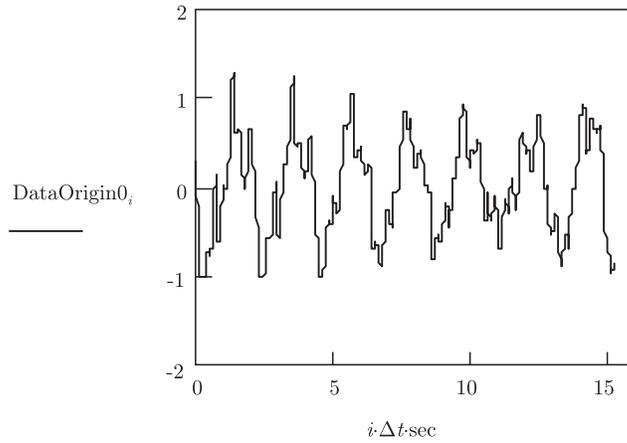


Рис. 1. Фрагмент записи ускорений осциллирующего объекта длиной в 15.18 с

Физические представления о природе и характере осцилляций объекта позволяют выдвинуть гипотезу о возможности моделировать его суперпозицией осцилляторов с демпфированием и на этом основании сформировать модель $M(\alpha, t, x)$. В этом случае отклик объекта на сигнал возбуждения типа δ -функции в фиксированной точке регистрации —

$$y(t) = \sum_{s=1}^S A_s \exp\{-\alpha_s t\} \sin(\omega_s t) + n(t). \quad (6)$$

Рассматривается модель для наблюдаемых данных в полевом эксперименте, который основывается на измерении естественного фона объекта в фиксированной точке в сейсмическом диапазоне частот.

$A_s, \alpha_s, \omega_s, \psi_s$ — свободные параметры модели; S — множество рассматриваемых однотипных подмоделей, суперпозиция которых моделирует процесс (6).

Задача заключается в оптимальном определении свободных параметров модели. Критерием оптимальности выбирается степень близости модели к наблюдаемым данным в выбранной метрике. В метрике L_2 критерий представляет собой функционал для каждой из компонент вида:

$$F(\mathbf{\Pi}) = \left\| \left(\sum_{s=1}^S A_s \exp\{-\alpha_s t\} \sin(\omega_s(t - \psi_s)) \right) - y(t) \right\|_{L_2}. \quad (7)$$

Здесь в матрицу $\mathbf{\Pi}$ сведены свободные параметры модели; s -й столбец в матрице — это вектор свободных параметров \mathbf{P}_s однотипной подмодели с номером s :

$$\mathbf{P}_s^T = \{A_s, \alpha_s, \omega_s, \psi_s\}, \quad s = \overline{1, S}. \quad (8)$$

Зафиксировав S , сведем векторы \mathbf{P}_s в вектор \mathbf{P} размерностью $4 \times S$,

$$\mathbf{P} = \{P_j\}, \quad j = \overline{1, 4S}.$$

Оптимальное решение — это точка глобального минимума функционала (7). Глобальный экстремум отыскивался на множестве локальных, которые вычислялись в окрестности “выброшенных” методом Монте-Карло, по априорным распределениям, параметров [7].

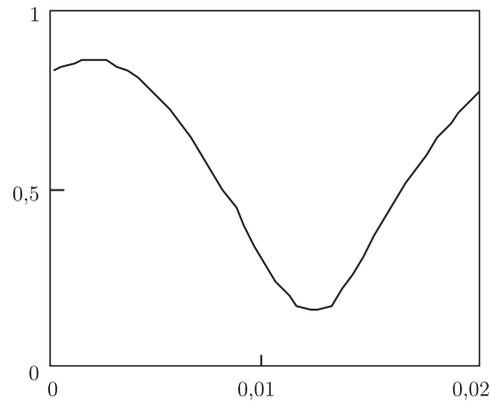


Рис. 2. Проекция сечения критерия на плоскость — круговая частота одной из гармоник — критерий

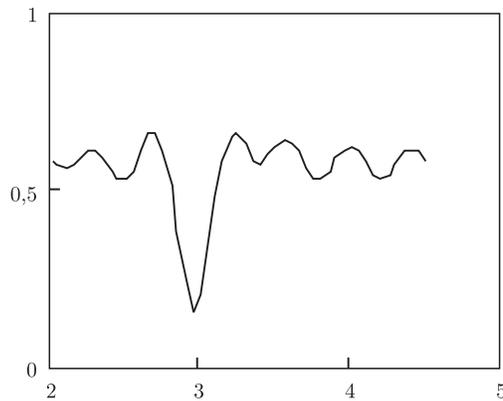


Рис. 3. Проекция сечения критерия на плоскость — сдвиг фазы одной из гармоник — критерий

Для определения точек экстремума нашего критерия $F(\mathbf{P})$ отыскиваем $\min\{F(\mathbf{P})\}$; $\mathbf{P} \in \mathfrak{A}$ на множестве \mathfrak{A} возможных значений \mathbf{P} .

Методом Монте-Карло, по априорным распределениям, получаем точку в 16-мерном пространстве, в окрестности которой отыскивается локальный экстремум, находим глобальный, дающий минимум критерию (7).

Итак, находим глобальный минимум функционала $F(\mathbf{P})$ на множестве допустимых, с известным априори распределением, векторов \mathbf{P} из множества \mathfrak{A} .

Результаты расчетов для модели из четырех затухающих гармоник сведены в векторы размерности 4, объединяющие одномерные параметры, т. е. рассматривается 16-параметрическая модель.

Критерий в 16-мерном пространстве имеет сложную, овражистую топографию поверхности с множеством локальных экстремумов. Это видно из сечений критерия, представленных на рис. 2 и 3, где для фиксированных 14 значений свободных параметров критерий рассматривается как функция лишь двух оставшихся. Это частота одной из гармоник в rad/sec (отложена по оси абсцисс на рис. 2) и смещение по фазе этой же гармоники в секундах (отложено по оси абсцисс на рис. 3). По оси ординат показано значение критерия в относительных единицах. Такой вид критерия и обусловил подход к поиску глобального минимума, принятого в этой работе, а именно, — метод случайного поиска по априорным распределениям.

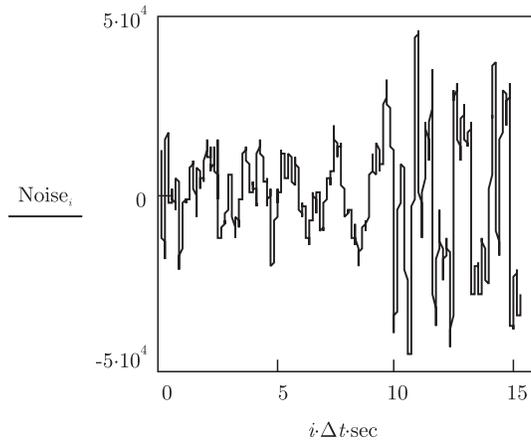


Рис. 4. Кривая фона после обработки

Глобальный минимум критерия в этом примере достигается в точке 3 rad/sec круговой частоты первой из гармоник модели (6) и при сдвиге по фазе этой же гармоники на 0,12 с при фиксированных остальных значениях параметров модели.

Рис. 2 и 3 дают представление о том, как близко в пространстве параметров нужно попасть к точке глобального минимума в методе Монте-Карло, чтобы не выйти на локальный минимум и получить не оптимальное решение.

Таким образом, получим оптимальную оценку параметров модели для наблюдаемых данных. Следующим шагом в обработке данных будет синтез по параметрам модели модельного сигнала и оценки невязки модели с наблюдаемыми данными для выбранного критерия.

Приведенные выше расчеты даны с целью показать всю цепочку в компьютеризированной технологии оценки свободных параметров в моделях и даны только для одной из компонент записи осциллирующих ускорений. На рис. 4 представлен сейсмический фон, полученный в результате вычитания оптимальной модели (6) из данных, рассмотренных в нашем примере. По оси ординат здесь отложена амплитуда фона в относительных единицах. Сравнение значений амплитуд фона до обработки (см. рис. 1) и после (см. рис. 4) показывает эффективность предложенной процедуры подавления сейсмического фона.

Физически содержательную ценность имеют прежде всего значения частот и логарифмического декремента объекта исследования. Особенно важны последние, поскольку дают представление о добротности системы, ее способности накапливать и удерживать на время энергию внешних возмущений. Высокая добротность (малый декремент) на некоторых частотах в модели характеризует особую чувствительность объекта к внешним возмущениям на этих частотах. Например, динамические изменения декремента в сторону уменьшения — это признак готовности объекта к разрушению от слабого внешнего воздействия. К сожалению, используемый в статье метод Монте-Карло дает сходимость к решению лишь по вероятности. Количество циклов вычислений должно быть достаточно большим для уверенности в правильности результата, что становится затруднительным при большой размерности модели, или нужно обладать хорошими априорными представлениями об ожидаемом результате. В заключение, приведем оптимальные параметры для исследованного объекта.

Транспонированный вектор собственных угловых частот:

$$\omega^T = \{2.963 \quad 9.025 \quad 20.298 \quad 26.063\} \frac{\text{rad}}{\text{sec}}.$$

Транспонированный вектор амплитуд собственных частот, отнесенных к наименьшей гармонике:

$$\mathbf{A}^T = \{1 \quad 0.638 \quad 0.324 \quad 0.037\}.$$

Транспонированный вектор декрементов на собственных частотах:

$$\boldsymbol{\alpha}^T = \{0.016 \quad 2.063 \quad -0.216 \quad 0.738\}.$$

Транспонированный вектор сдвигов по фазе, в рад,

$$\boldsymbol{\psi}^T = \{3.062 \quad -0.204 \quad 2.944 \quad -8.112E - 3\} \text{rad}.$$

Транспонированный вектор собственных частот:

$$\mathbf{f}^T = \{0.472 \quad 1.436 \quad 3.231 \quad 4.148\} \text{Hz}.$$

Нами предложен эффективный метод анализа природных и рукотворных объектов, собственные частоты которых лежат в сейсмическом и нижней части акустического диапазонов частот, основанный на мониторинге их динамики; новый подход для идентификации состояния таких объектов, а также предложена нетрадиционная модель естественного фона объекта мониторинга в виде суперпозиции затухающих, либо возрастающих гармоник. Модель дает возможность оценить такой важный в описании объекта параметр, как его добротность, динамика которого может дать представление о его “возрастных” изменениях.

1. *Mostovoy S., Mostovoy V.* Active monitoring and decision making problem. IJ ITA Vol. 12, Numb. 4, Sofia, 2005. – p 127–135.
2. *Мостовой С. В., Мостовой В. С., Осадчук А. Е.* Модель активного сейсмического мониторинга // Геофиз. журн. – 2005. – **24**, № 6. – С. 132–138.
3. *Лебедич И. Н., Мостовой С. В., Мостовой В. С.* Современные подходы к анализу динамической стабильности природных и техногенных объектов на примере мониторинга монумента колонного типа // Геофиз. журн. – 2004. – **24**, № 6. – С. 132–138.
4. *Dahlman O., Israelson H.* Monitoring underground nuclear explosions. – Amsterdam – Oxford – New York, 1977. – 440 p.
5. *Беллман Р.* Динамическое программирование. – Москва: Мир, 1960. – 459 с.
6. *Plessix R.-E.* A review of the adjoint-state method for computing the gradient of a functional with geophysical applications // Geophys. J. Int. – 2006. – **167**. – P. 495–503.
7. *Соболев М. М.* Численные методы Монте-Карло. – Москва: Наука, 1973. – 311 с.

*Институт геофизики им. С. И. Субботина
НАН Украины, Киев*

Поступило в редакцию 07.05.2007