

УДК 622.83:550.343

А.С. Бахтина, Д.И. Блохин, В.И. Шейнин

**НЕПРЕРЫВНОЕ ВЕЙВЛЕТ – РАЗЛОЖЕНИЕ
КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ ИНФОРМАТИВНОСТИ
СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ ФИЗИЧЕСКИХ
ИЗМЕРЕНИЙ В СИСТЕМАХ ГЕОКОНТРОЛЯ ***

Семинар № 2

Одной из проблем исследования сигналов физических полей, регистрируемых системами геоконтроля, является установление признаков (информативных параметров), на основе которых возможно выявление диагностических критериев аномальных проявлений изменений во времени напряженного состояния породного массива.

Проведенный анализ литературных данных о вариациях физических полей, сопутствующих изменениям во времени напряжений в массивах горных пород при реализации в них некоторых характерных быстропротекающих геомеханических процессов, позволяет выделить ряд особенностей, присущих таким сигналам: вариабельность, как во временной, так и в частотной области; сильная зашумленность, в том числе и техногенными помехами; влияние на сигналы длиннопериодных воздействий (обусловленных влиянием внешних факторов); локализованность аномалий во времени [1 – 3].

В связи с вышесказанным применяемые в системах геоконтроля математические методы должны быть пригодны для анализа нестационарных

сигналов со значительной частотно-временной вариабельностью.

Традиционно при обработке данных геофизических измерений большое внимание уделяется спектрально-корреляционному анализу [1 – 4]. Однако, классические методы расчета корреляционных функций или спектра мощности могут применяться лишь в случае стационарных процессов и для получения надежных количественных оценок требуют большой длительности сигналов. Поэтому при обработке соответствующих рядов экспериментальных данных приходится прибегать к различным искусственным приемам, чтобы хотя бы приближенно обрабатывать реальные нестационарные сигналы с использованием стандартных алгоритмов спектрального анализа, подразумевающих, так или иначе, стационарность обрабатываемых последовательностей [4].

Более эффективно данную задачу позволяют решать методы, основанные на теории вейвлет – преобразования [5 – 7], для которой в настоящее время хорошо развита математическая база, и которая нашла широкое применение в обработке сигналов различной природы.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 07-05-12057).

С помощью вейвлет – преобразования нестационарный случайный сигнал анализируется путем разложения по базисным функциям, полученным из некоторого прототипа путем сжатия (растяжения) и сдвигов. Функцию–прототип называют анализирующим, или материнским вейвлетом, выбранным для исследования конкретного сигнала [5–7].

Вычисление вейвлет–преобразования функций $f(x)$, интеграл от которых в бесконечных пределах имеет конечное значение, осуществляется путем свертки исследуемой функции $f(x)$ с базисной вейвлет–функцией:

$$W(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi^* \left(\frac{x-b}{a} \right) dx \quad (1)$$

Примером подобной базисной функции служит вейвлет Морле [5–7]:

$$\psi(x) = \exp \left(i5x - \frac{x^2}{2} \right) \quad (2)$$

Данная функция дает результаты, наиболее согласованные с терминами Фурье–анализа. В частности, вейвлет Морле обладает частотной локализацией, лучшей среди других базисов, и в связи с этим является наиболее предпочтительным для решения задач идентификации частот составляющих сигнала [5–7].

Результатом непрерывного вейвлет – преобразования сигнала является двумерная функция $W(a, b)$, а функцию $|W(a, b)|$, являющуюся оценкой энергетического спектра, обычно называют скалограммой (вейвлет – спектром), подчеркивая тем самым ее способность описывать распределение энергии сигнала по масштабам. При построении скалограммы, точки на плоскости параметров (a, b) отображают в зависимости от величины коэффициентов $|W(a, b)|$ цветом различной интенсивности [5–7].

Целью настоящего сообщения является обоснование использования параметров непрерывного вейвлет–представления для повышения информативности спектрального анализа данных инфракрасной (ИК-) диагностики изменений во времени напряженного состояния геоматериалов.

В основе разрабатываемого в НИИОСП им. Н.М. Герсеванова бесконтактного метода геоконтроля (ИК–радиометрия) лежит физическая модель связанная с известным в физике твердого тела «термоупругим эффектом» – изменением температуры упругой среды при ее адиабатическом деформировании. Термодинамическая теория такого эффекта известна давно [8]. При адиабатическом деформировании вариации температуры $\delta T(t)$ в точке среды во времени t “подобны” вариациям первого инварианта $\delta \Pi(t)$ тензора напряжений (формула Кельвина) [8 – 10]:

$$\delta T(t) = A_m T_0 \delta \Pi(t), \quad (3)$$

где A_m зависит от плотности и теплофизических свойств материала, T_0 – температура до начала деформирования.

В описываемой методике применяется принцип бесконтактного измерения малых вариаций температуры, основанный на известной зависимости мощности ИК–излучения с поверхности тела от ее температуры $W(T) = \varepsilon_T \omega T^4$ ($\varepsilon_T < 1$ – коэффициент излучательной способности, ω – постоянная Стефана–Больцмана) [11]. Отмеченная малость $\delta T(t)/T_0$, позволяет линеаризовать последнее соотношение и связать вариации мощности потока $\delta W(t)$ со значениями $\delta T(t)$ пропорциональной зависимостью с коэффициентом $A_c = 4\varepsilon_T \omega T_0^4$.

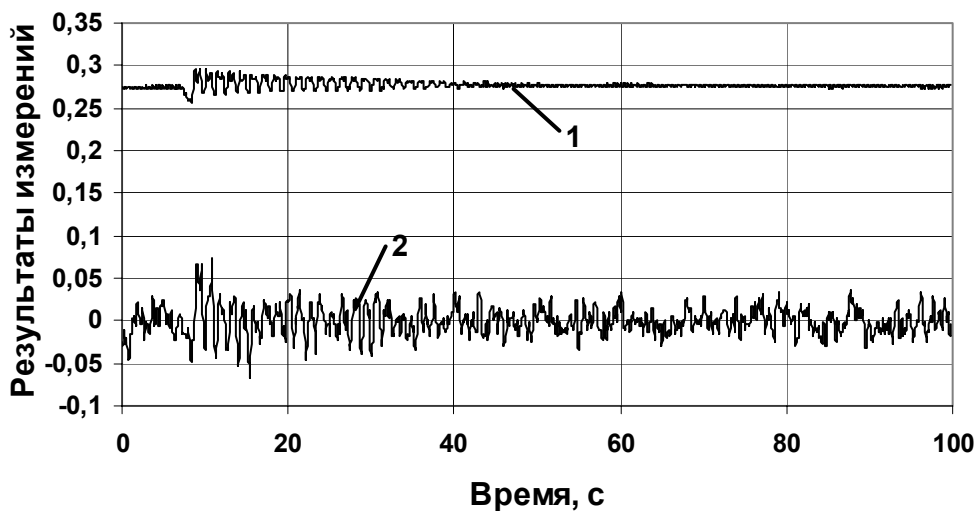


Рис. 1. Экспериментальные результаты измерений выходных сигналов тензометрии (мессдозы) (1) и ИК-радиометрии (2)

Предполагая далее пропорциональность вариаций результатов ИК-измерений $\delta U(t)$ вариациям $\delta W(t)$ с коэффициентом A_r , зависящим от параметров аппаратуры, и используя (3), получаем:

$$\delta P(t) = A^{-1} \delta U(t), \quad (4)$$

где $A = A_m A_c A_r$, (1/МПа).

Принципиальная возможность использования ИК-радиометрии для идентификации относительно быстрых изменений во времени напряженного состояния геоматериалов показана в исследованиях НИИОСП им. Н.М. Герсееванова, в частности, в работах [12–15].

Прежде чем приступить к описанию спектральных характеристик и оценки их информативности, следует указать на одну методическую особенность экспериментов [12 – 15], проводившихся для обоснования эффективности методики ИК-измерений в достаточно широком диапазоне режимов изменения нагрузки во времени. Суть её состоит в том, что вариации напряжений идентифицируются

не только по измерениям мощности ИК-излучения, но и непосредственно по «эталонным» синхронным записям показаний стандартных электромеханических датчиков (тензодатчиков). Данная особенность экспериментов создает возможность определения параметров одного и того процесса по записям, регистрируемым независимыми датчиками, измерительные свойства которых основаны на разных физических эффектах, и сравнения получаемых оценок.

Пример характерной записи выходных сигналов тензометра ($V_m(t)$) и ИК-радиометра ($V_w(t)$), отражающих эволюцию отклика среды на квазипериодическое воздействие, представлен на рис. 1, на котором видно, что реальные результаты ИК-измерений обладают весьма сложной структурой. В них, наряду с существенно нестационарной в данном эксперименте составляющей, непосредственно связанной с механическими процессами

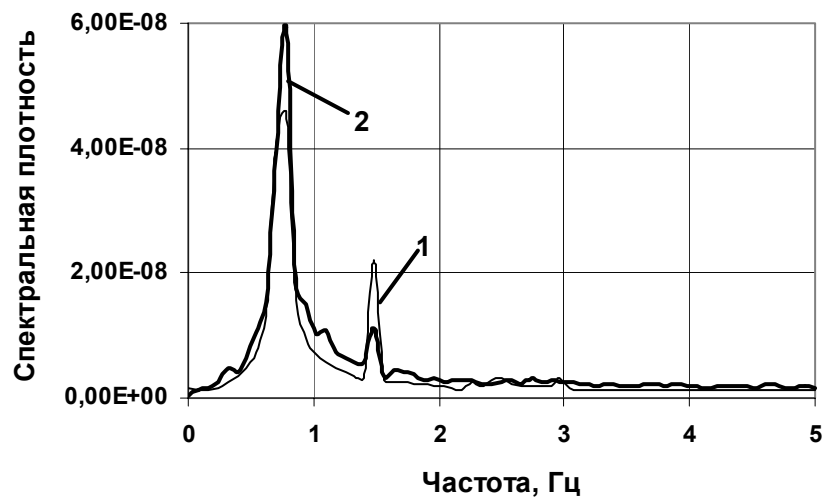


Рис. 2. Спектральные плотности вариаций напряжений $\delta\Pi_m(t)$ и $\delta\Pi_w(t)$, по данным с мессдозы $H_{\Pi_m}(\nu)$ (1) и с ИК-радиометра $H_{\Pi_w}(\nu)$ (2), МПа²×с.

в образце, содержится относительно высокочастотная компонента, отражающая неизбежное наличие случайных аппаратурных и других «шумов». Кроме того, в записи прослеживается «тренд», вызываемый относительно медленными (в масштабе времени опыта) изменениями внешних тепловых условий. График функции $V_m(t)$, характеризующий тот же процесс нагружения образца и поэтому также имеет нестационарный вид, но при этом он более гладкий и не имеет явного «тренда». Добавим, что по представленным на рис. 1 зависимостям оценить степень идентичности «рабочего» (ИК-) и «эталонного» сигналов без специальной обработки практически невозможно.

Для вычисления оценок изменений во времени первого инварианта тензора напряжений $\delta\Pi_w(t)$ и $\delta\Pi_m(t)$ (МПа) соответственно по зависимостям $V_w(t)$ и $V_m(t)$ использовались переходные коэффициенты, величины которых определялись по данным та-

рировки, проводившейся перед каждой серией экспериментов.

Для количественного описания экспериментальных записей и идентификации «полезной» информации привлекались методы спектрального анализа, основанные на Фурье и вейвлетном преобразованиях. При этом, в соответствии с рекомендациями [4], выполнялась коррекция обрабатываемых временных последовательностей с целью удаления из них низкочастотных «трендов».

На рис. 2 показаны графики определенных после упомянутой корректировки исходных записей оценок зависящих от частоты ν спектральных плотностей $H_{\Pi_w}(\nu)$ и $H_{\Pi_m}(\nu)$, а на рис. 3 и рис. 4 адаптированные скалограммы с базовым вейвлетом Морле соответствующих зависимостей $\delta\Pi_w(t)$ и $\delta\Pi_m(t)$.

На представленных скалограммах по горизонтальной оси отложена величина сдвига вейвлет-функции, а по вертикальной — масштаб (в диапазоне

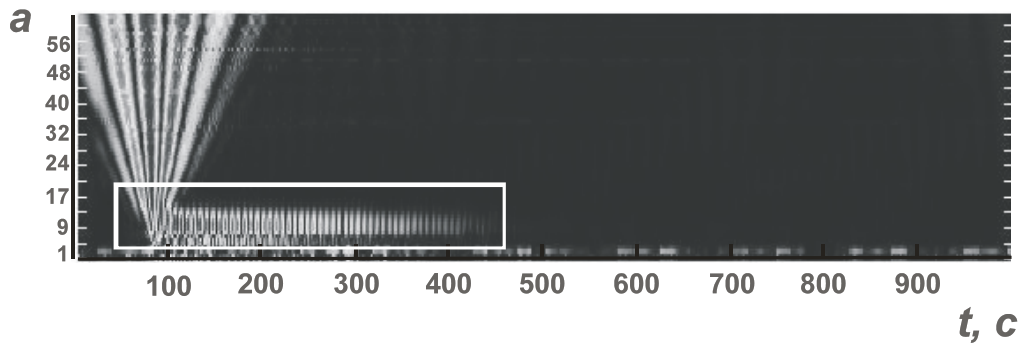


Рис. 3. Скалограмма (вейвлет – спектр) зависимости $\delta\Pi_m(t)$

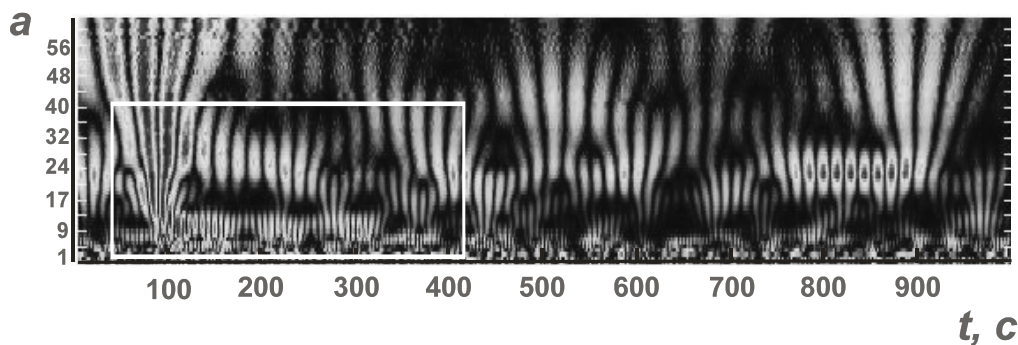


Рис. 4. Скалограмма (вейвлет – спектр) зависимости $\delta\Pi_w(t)$

от 1 до 64). Черный цвет соответствует минимальному значению, которое принимают вейвлет коэффициенты, белый – максимальному. Промежуточные значения соответствуют оттенкам серового цвета различной интенсивности.

Графики представленных на рис. 2 спектральных плотностей зависимостей $\delta\Pi_m(t)$ и $\delta\Pi_w(t)$ позволяют выявить по 2 основных пика, соответствующих частотам 0,75 и 1,5 Гц, что свидетельствует о совпадении спектральных характеристик исследуемых сигналов.

Для временных рядов данных, зная центральную частоту анализирующего вейвлета f_c (для вейвлета Морле $f_c=0.8125$ Гц), можно определить для точек (a_i, b_i) максимальной concentra-

ции энергии спектра частоты f_i с помощью выражения:

$$f_i = \frac{f_c}{a_i \Delta t} \quad (5)$$

Результаты расчета показывают, что доминирующим частотам в зависимостях $\delta\Pi_m(t)$ и $\delta\Pi_w(t)$ соответствуют следующие масштабные коэффициенты (при $\Delta t=0,1$ с): для частоты 0,75 Гц $a \approx 10$; для частоты 1,5 Гц $a \approx 5$.

Изображение вейвлет – спектра достаточно ясно выявляет наличие разномасштабной периодичности, содержащейся в анализируемых зависимостях. В нижней части обоих вейвлет-спектров видны колебания интенсивности, вызванные высокочастотными составляющими сигналов соответствующими частотам 0,75 и 1,5 Гц (выделены белой рамкой).

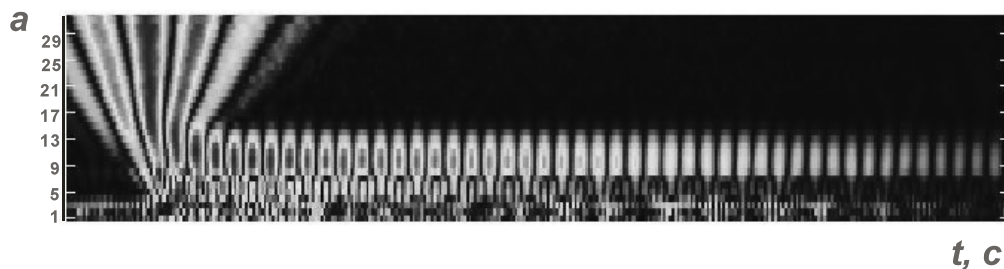


Рис. 5. Скалограмма (вейвлет – спектр) зависимости $\delta\Pi_m(t)$ (интервал 50 – 400 с)



Рис. 6. Скалограмма (вейвлет – спектр) зависимости $\delta\Pi_w(t)$ (интервал 50 – 400 с)

На рис. 5 и рис. 6 представлены увеличенные области скалограмм, соответствующие наиболее информативным интервалам.

На рис. 5 и рис. 6 имеются спектральные полосы, включающие масштабы (периоды), соответствующие периодам, выявленным с помощью преобразования Фурье, однако, в отличие от Фурье–спектра, мы видим, что и периоды и амплитуды этих полос изменяются с увеличением временной координаты. Наличие на скалограмме зависимости $\delta\Pi_w(t)$ остальных периодических структур обусловлено присутствием в сигнале составляющих аппаратурных шумов.

Таким образом, Фурье – и вейвлет – спектрограммы дополняют друг друга: первая обнаруживает в анализируемых данных гармонические или квазигармонические компоненты с

высоким частотным, но с нулевым временным разрешением, а вторая позволяет локализовать гармоники по времени (с плохим разрешением по масштабу).

Данный факт позволяет сделать вывод, что записи вариаций инфракрасного излучения с поверхности геоматериалов и применяемые к ним методы спектрального анализа (Фурье – и вейвлет – представления) позволяют идентифицировать признаки аномальных проявлений изменений напряженного состояния.

Предложенные методические рекомендации по применению непрерывного вейвлет – анализа для оценки спектральных характеристик нестационарных физических полей определяют возможности использования различных видов вейвлет – базисов при обработке данных отдельных методов горной геофизики.

1. Курленя М.В., Опарин В.Н. Скважинные геофизические методы диагностики и контроля напряженно-деформированного состояния массивов горных пород. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1999.
2. Курленя М.В., Вострецов А.Г., Кулаков Г.И., Яковицкая Г.Е. Регистрация и обработка сигналов электромагнитного излучения горных пород. – Новосибирск: Издательство СО РАН. 2000.
3. Шкуратник В.Л., Вознесенский А.С., Колодина И.В. Методы и средства изучения быстропотекающих процессов. – М.: Издательство МГТУ. 2005.
4. Хаттон Л., Уорддингтон М., Мейкин Дж. Обработка сейсмических данных. Теория и практика. – М.: Мир. 1989.
5. Витязев В.В. Вейвлет – анализ временных рядов. – СПб.: Издательство С.-Петербург. ун-та. 2001.
6. Короновский А.А., Храмов А.Е. Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. – М.: Физматлит. 2003.
7. Любушин А.А. Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. – М.: Наука. 2007.
8. W. Thomson (Lord Kelvin). Mathematical and Physical Papers. London (1990). 592 p.
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. – М.: ГИФМЛ. 1965.
10. Гольденблат И.И. Нелинейные проблемы теории упругости. – М.: Наука. 1969.
11. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. – М.: Советское радио. 1978.
12. Шейнин В.И., Левин Б.В., Мотовилов Э.А., Морозов А.А., Фаворов А.В. Идентификация периодических изменений напряженного состояния грунтов по изменениям плотности потока инфракрасного излучения // Прикладная механика и техническая физика. 2000. №6.
13. Шейнин В.И., Левин Б.В., Мотовилов Э.А., Морозов А.А., Фаворов А.В. Диагностика периодических изменений напряженного состояния геоматериалов по данным инфракрасной радиометрии // Известия РАН. Физика Земли. 2001. №4. С. 24 – 30.
14. Шейнин В.И., Левин Б.В., Блохин Д.И., Фаворов А.В. Особенности идентификации нестационарных изменений напряженного состояния геоматериалов по данным инфракрасной радиометрии // ФТПРПИ. 2003. № 5. С. 15 – 22.
15. Шейнин В.И., Левин Б.В., Блохин Д.И., Фаворов А.В. Инфракрасная диагностика отклика геоматериалов на импульсные и ударные нагрузки // ДАН. 2004. Т. 395. № 6. С. 822 – 824. **VIAS**

Коротко об авторах

Бахтина А.С. – студентка 6-го курса кафедры ФТКП МГТУ,
 Блохин Д.И. – доцент кафедры физики МГТУ, ведущий инженер НИИОСП им. Н.М. Герсеевича – филиала ФГУП НИЦ «Строительство», кандидат технических наук,
 Шейнин В.И. – профессор, доктор технических наук, заведующий лабораторией геомеханики подземных сооружений НИИОСП им. Н.М. Герсеевича – филиала ФГУП НИЦ «Строительство».

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 2 симпозиума «Неделя горняка-2008». Рецензент д-р техн. наук, проф. В.Л. Шкуратник.

