

УДК 622.83

Д.И. Блохин, В.Н. Одинцев, В.И. Шейнин

**РЕЗУЛЬТАТЫ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА
ДАННЫХ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ ОСОБЕННОСТИ
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ПОРОД ВБЛИЗИ
ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТОК***

Семинар № 2

Одним из определяющих факторов, влияющих на безопасность разработки недр, является пространственно-временная изменчивость механических свойств подработанного массива горных пород. Учет таких особенностей геомеханических объектов в инженерных расчетах основывается, главным образом, на закономерностях, установленных в результате анализа пространственных и временных рядов разнородных геодезических и геолого-геофизических наблюдений [1..3].

Мы полагаем, что новые аспекты развития методологии обработки и анализа результатов натурных измерений различных геомеханических параметров могут быть связаны с внедрением современных методов идентификации сложных структурированных сигналов, в основе которых лежат преобразование Фурье и вейвлет – анализ [4..7]. В данном сообщении термин «сигнал» применяется для обозначения любого упорядоченного набора численно фиксированной информации о каком-либо процессе, объекте функции и т.п. Сигнал может быть функцией каких-либо пере-

менных, будь то время, пространственные координаты или какие-то другие (вообще говоря, n – мерные) величины. Под «анализом» сигнала имеется в виду не только его чисто математическое преобразование (в частности, Фурье или вейвлет-преобразование), но и получение на основе этого преобразования выводов о специфике соответствующего процесса или объекта.

В настоящей работе проведен анализ полученных ранее проф. М. А. Иофисом натурных профильных распределений деформаций толщи пород и земной поверхности [8]. Замеры смещений пород проводились на шахте «Шевелевская» и шахте им. Ю.А. Гагарина (Донбасс) в соответствии с инструкцией [9].

На шахте «Шевелевская» после проходки одиночной горизонтальной выработки длиной свыше 300 м (квершлаг горизонта 176 м) в стенке выработки последовательно через 2 м были установлены жесткие стенные реперы, заглубленные на 0.5 м от поверхности выработки.

В процессе наблюдений фиксировались смещения реперов относительно

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 05-05-65008).

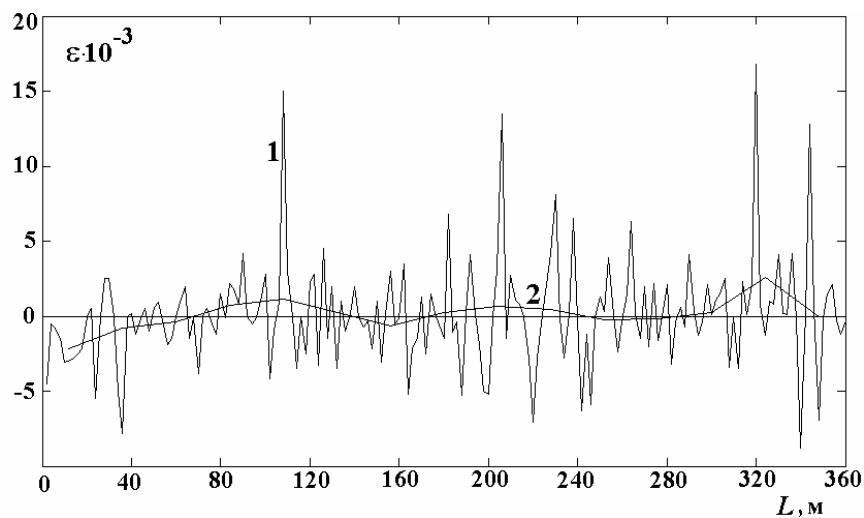


Рис. 1. Распределение горизонтальных деформаций пород вдоль квершлага (шахта «Шевелевская»), база измерения: 1 – 2 м; 2 – 24 м

друг друга. Точность измерения смещений составляла 0.1 мм. После активной фазы процесса сдвижения пород, которая была вызвана воздействием очистных работ на нижележащих горизонтах и продолжалась свыше двух лет, смещения реперов пород были пересчитаны в деформации массива горных пород. Масштаб воздействия очистных работ в сопоставлении с расстоянием между реперами давал основания считать, что техногенное воздействие на контролируемые участки массива горных пород было достаточно однородным, а неоднородность пространственного распределения деформаций пород была вызвана локальной неоднородностью массива пород.

На рис. 1 зависимость 1 соответствует горизонтальным деформациям пород вдоль квершлага по прошествии примерно трех лет после заложения реперов. Как видно распределение деформаций вдоль квершлага является резко неоднородным, имеют место отдельные пики деформаций различных знаков. При достаточно большом расстоянии между реперами распределение дефор-

маций приобретает «сглаженный» вид (зависимость 2). В среднем на рассматриваемом участке массива горизонтальные деформации почти равны нулю.

В результате визуальных обследований установлено, что острые пики деформаций обычно приурочены к природным трещинам или контактам пород с резко различными свойствами, которые активизируются при техногенном воздействии на массив. Это особенно отчетливо проявляется в процессе образования уступов в мульде сдвижения пород земной поверхности. Поэтому есть веские основания использовать распределения деформаций, подобные тем, что показаны на рис. 1, в анализе закономерностей природной трещинной структуры массива горных пород.

На первый взгляд исследуемое распределение (зависимость 1 на рис. 1) с ярко выраженной переменной локальной амплитудой отражает случайную природу расположения «пиков» деформаций (природных трещин) в массиве пород. Кажется, что распределение лишено какой-либо детерминированной составляющей и являются «белым шу-

мом». Для исследования этого вопроса воспользуемся ранее апробированными авторами алгоритмами спектрального анализа нестационарных случайных функций [6, 7], основанными на преобразовании Фурье и непрерывном вейвлет – преобразовании и, реализованными в приложениях современных математических программных пакетов (Mathcad, Matlab).

Преобразование Фурье переводит временное распределение силы сигнала в распределение частот, по которому можно судить о значимости (энергетическом спектре) частот, входящих в разложение исследуемого сигнала. В рассматриваемом случае сигналом является пространственное распределение деформаций, а условная частота характеризует повторяемость значений деформаций при изменении пространственной координаты и равна величине, обратной периоду повторяемости сигнала.

На рис. 2 представлена периодограмма – обработанные результаты спектрального Фурье – анализа соответствующие неоднородному распределению деформаций, показанному на рис. 1. Оси абсцисс приведенных периодограмм соответствуют обратным значениям частот, т.е. периодам P . Значения ординат характеризуют спектральную энергию Q – квадрат амплитуды сигнала соответствующей частоты.

На анализируемой периодограмме нетрудно заметить наличие 6 амплитудных пиков, превышающих 99 – процентный порог обнаружения сигнала в шумах [4, 5]. Эти пики могут свидетельствовать о существовании в распределении деформаций пород вдоль квершлага гармонических компонент с периодами $P_1 = 5.1$ м; $P_2 = 7.6$ м; $P_3 = 11.5$ м; $P_4 = 16.3$ м; $P_5 = 23.8$ м; $P_6 = 29.8$ м. Интересно отметить, что отношение значение

периодов приблизительно равно $P_{i+1} / P_i \cong 1.42$.

Зависимости аналогичные представленной на рис. 1 были получены в результате измерений горизонтальных деформаций земной поверхности в окрестности подземных выработок на шахте «Шевелевская» и шахте им. Ю.А. Гагарина (наблюдательная станция №158). Как следует из расчетов, в распределении горизонтальных деформаций земной поверхности над квершлагом (шахта «Шевелевская») можно выделить следующие периоды высокой концентрации деформаций: $P_1 = 4.9$ м; $P_2 = 7.6$ м; $P_3 = 11.5$ м; $P_4 = 13.3$ м; $P_5 = 17.0$ м; $P_6 = 44.7$ м. Отношение значение периодов приблизительно равно $P_{i+1} / P_i \cong 1.63$. В пространственном распределении деформаций земной поверхности на участке измерительной станции 158, выделяются следующие периоды высокой концентрации деформаций: $P_1 = 5.3$ м; $P_2 = 7.8$ м; $P_3 = 12.2$ м; $P_4 = 17.3$ м; $P_5 = 21.8$ м. Отношение значение периодов приблизительно равно $P_{i+1} / P_i \cong 1.43$. Более детальное описание указанных результатов дано в сообщении [8].

Пример применения Фурье – преобразования для анализа особенностей развития деформационного процесса во времени приведен ниже. В исследованиях использованы данные Института горного дела УрО РАН, сотрудники которого более 25 лет проводили масштабные инструментальные наблюдения за сдвижением горных пород на шахте «Северопесчанская» [10]. С целью выявления возможной периодичности в неоднородном сдвижении трещинно-блочного массива горных пород был проведен анализ динамики смещения одного из реперов наземной наблюдательной станции.

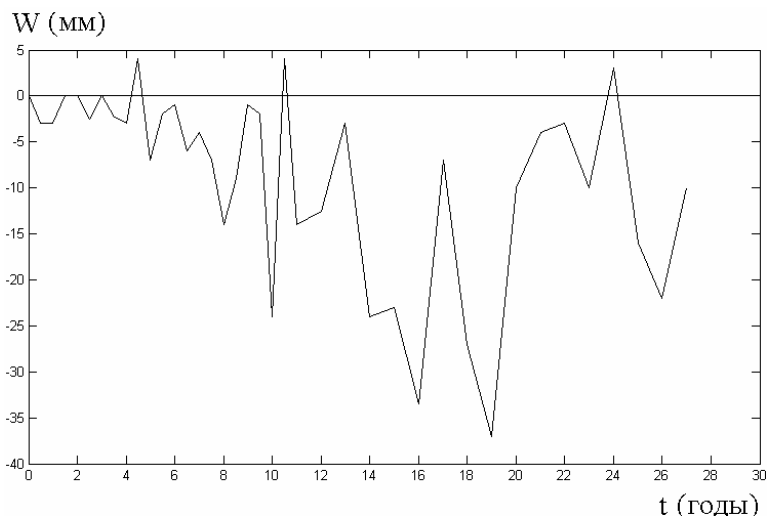


Рис. 3. График шагового приращения вертикального смещения W (миллиметры) репера №12 в течение периода наблюдений 1975 – 2001 гг. (профильная линия 15 на земной поверхности, шахта «Северопесчанская», данные ИГД УрО РАН, проф. А.Д. Сашурин)

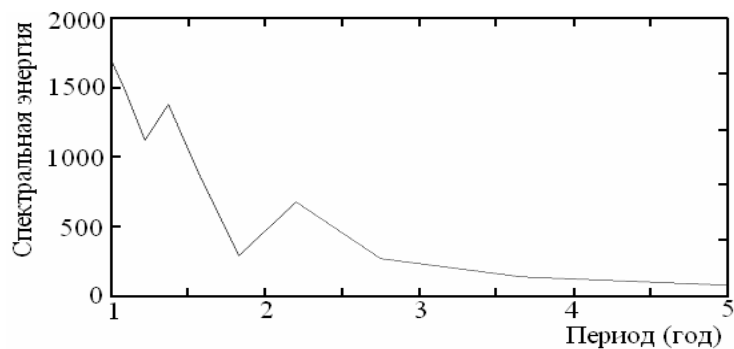


Рис. 4. Периодограмма приращений смещений репера в течение первого этапа маркшейдерских наблюдений (1975 – 1983 гг.)

На рис. 4 приведена полученная в результате спектрального Фурье – анализа периодограмма для начального этапа наблюдений, на котором замеры производились дважды в год.

На рис. 5 приведена периодограмма для второго этапа наблюдений, когда замеры проводились один раз в год.

Из сопоставления значений спектральной энергии следует, что в рассматриваемой зависимости действи-

тельно имеется определенная периодичность, характерная для второго этапа наблюдений (период 3.2 года), однако выражена эта периодичность довольно слабо. Из сопоставления периодограмм рис. 2 и рис. 4, 5 следует, что в зависимости, показанной на рис. 3, намного меньше детерминированного фактора, чем в зависимости рис. 1, которая на первый взгляд кажется очень хаотичной.

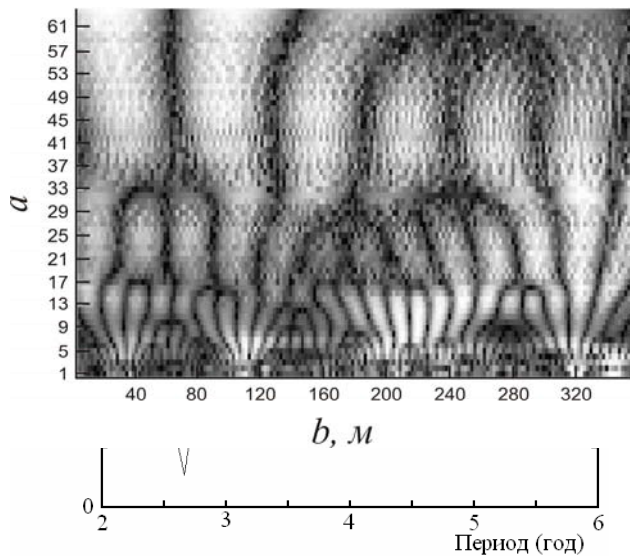


Рис. 5. Периодограмма приращений смещений репера в течение второго этапа маркишейдерских наблюдений (1984 – 2001 гг.)

мени (пространстве) быстроубывающую функцию:

$$\psi_{ab}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (1)$$

где a представляет собой масштабный коэффициент и определяет величину растяжения вейвлета, b определяет величину сдвига вейвлет-функции и в данном случае имеет размерность пространственной координаты.

Таким образом, спектральный анализ на основе преобразования Фурье позволяет давать объективные оценки и выявлять скрытые особенности процессов деформации горных пород.

Результаты, полученные с помощью спектрального Фурье-анализа, были также подтверждены использованием техники вейвлет – преобразования.

Эффективным инструментом, позволяющим выявить наличие в исходном ряде измеренных значений разномасштабные флуктуации, локализованные по времени (или по координате), является непрерывный вейвлет – анализ [5]. С помощью вейвлет – преобразования нестационарный случайный сигнал анализируется путем разложения по базисным функциям, полученным из некоторого прототипа (материнского вейвлета) путем сжатия (растяжения) и сдвигов. В отличие от

Фурье-преобразования, где в качестве базиса используются гармонические функции, базис вейвлет-разложения определен через локализованную во вре-

ты.

Вычисление вейвлет- преобразований функций $f(x)$, интеграл от которых в бесконечных пределах имеет конечное значение, осуществляется путем свертки исследуемой функции $f(x)$ с базисной вейвлет-функцией [5]:

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

Результатом непрерывного вейвлет – преобразования сигнала является двумерная функция $W(a, b)$, а функцию $|W(a, b)|^2$ 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 $|W(a, b)|^2$ цветом различной интенсивности [5].

На рис. 6 показана адаптированная скалограмма зависимости 1, представленной на рис. 1.

По горизонтальной оси отложена величина сдвига вейвлет – функции, а по вертикальной – масштаб (в диапазоне от 1 до 64). Черный цвет соответствует минимальному значению, которое принимают вейвлет коэффициенты, белый – максимальному. Промежуточные значения соответствуют оттенкам серового цвета различной интенсивности.

В качестве базисной функции нами использовался вейвлет – функция Морле, [5]:

$$\psi(t) = \exp\left(i5t - \frac{t^2}{2}\right).$$

(3) 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].

Изображение вейвлет – спектра достаточно ясно выявляет наличие разномасштабной периодичности, содержащейся в анализируемой зависимости. В нижней части спектра видны колебания интенсивности, вызванные высокочастотными составляющими сигнала, в то время как более низкочастотные компоненты образуют различные структуры в средней и верхней части изображения.

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 концентрации энергии спектра частоты f_i с помощью выражения:

Рис. 6. Скалограмма (вейвлет – спектр) распределения горизонтальных деформаций пород вдоль квершлага

$$f_i = \frac{f_c}{a_i \Delta x}. \quad (4)$$

Однако в рассматриваемом случае понятие масштаба полностью соответствует периоду спектральных компонент, как в связи со свойствами используемого вейвлета, так и в связи с определением условной частоты введенной выше для исследуемого пространственного распределения деформаций.

На 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 пространственной координаты.

Этот факт говорит о том, что периодограмма и вейвлет-спектрограмма 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 пространственной координате (с плохим разрешением по масштабу).

Представленные результаты говорят о правомерности использования вейвлет-анализа, по меньшей мере, как дополнительного средства, для выявления разномасштабных скрытых периодичностей в последовательностях пространственных измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Певзнер М.Е., Иофис М.А., Попов В.Н. Геомеханика. – М.: Изд. МГГУ. 2005.

2. Курленя М. В., Опарин В. Н. Проблемы нелинейной геомеханики. Часть I. // ФТПРПИ. 1999. № 5. С. 12 – 26.

3. Шейнин В. И. Интерпретация составляющих пространственной изменчивости механических свойств горного массива и оценка их вероятностных характеристик // ФТПРПИ. 1982. № 4. С. 3 – 8.
4. Каждан А. Б., Гуськов О. И. Математические методы в геологии. – М.: Недра. 1990.
5. Витязев В. В. Вейвлет–анализ временных рядов. – СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та. 2001.
6. 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.
7. Шейнин В. И., Блохин Д. И. Опыт использования алгоритмов вейвлет–анализа для идентификации динамических процессов в геоматериалах // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2005. № 2. С. 7 – 10.
8. Иофис М. А., Одинцев В. Н., Блохин Д. И. Спектрально – корреляционный анализ профильных распределений деформаций пород // Маркшейдерия и недропользование. 2006. № 4. С. 42 – 44.
9. Инструкция по наблюдениям за движением горных пород и земной поверхности при подземной разработке рудных месторождений. – М.: Недра. 1988.
10. Сашурин А. Д. Сдвигение горных пород на рудниках черной металлургии. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН. 1999. **ГИАБ**

Коротко об авторах

Блохин Дмитрий Иванович – доцент кафедры физики, кандидат технических наук, Московский государственный горный университет,

Одинцев Владимир Николаевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, ИПКОН РАН,

Шейнин Владимир Исаакович – профессор, доктор технических наук, заведующий лабораторией геомеханики подземных сооружений НИИОСП им. Н.М. Герсванова – филиала ФГУП НИЦ «Строительство».

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 2 симпозиума «Неделя горняка-2007».

Рецензент д-р техн. наук, проф. *В.Н. Попов*.

