

ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННОГО РЯДА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА СИНГУЛЯРНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Л.Е. ПОДЛИПЕНСКАЯ, С.И. ДОЛГОПЯТЕНКО

Донбасский государственный технический университет, Алчевск

Выполнен SSA анализ динамических рядов акустической эмиссии и метанообильности. Определены структуры рядов и выявлены их взаимосвязи. Установлена возможность прогноза динамики ряда метанообильности выемочного участка на основе компонент ряда акустической эмиссии.

ВВЕДЕНИЕ

Экстремальные явления газовыделения в угольных шахтах имеют негативные социальные, технологические, экономические и экологические аспекты. Особо опасные максимальные метановыделения происходят при периодических обрушениях пород, изменяющих напряженное состояние массива. Широкое применение для оценки геомеханических процессов получил сейсмоакустический метод, основанный на использовании естественных акустических импульсов, возникающих в массиве пород вследствие микроразрушений, обусловленных общим или локальным ростом напряжений [1]. Регистрацию импульсов ведут с помощью специальных датчиков - геофонов, устанавливаемых в скважины и воспринимающих звуковые колебания, возникающие в окружающем массиве при микроразрушениях. Число импульсов, регистрируемых в единицу времени, соответствует числу единичных микроразрушений в массиве пород вблизи места нахождения геофона. Упорядоченная во времени совокупность импульсов формирует динамический ряд, исследование которого позволяет по ретроспективным данным выявить его основные закономерности и взаимосвязи с метанообильностью в лаве и на участке и осуществить текущий прогноз как для данной лавы и участка с некоторым горизонтом прогноза, так и предварительный прогноз для вновь вводимой лавы, принимая данную лаву лавой – аналогом для новой.

1. МЕТОД СИНГУЛЯРНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

В настоящее время существует несколько общепринятых методов прогнозирования временных рядов: регрессионные, ARIMA-модели, нейросетевые методы, методы, основанные на сингулярном разложении (SSA). Достоинством метода «Гусеница»-SSA является отсутствие требования априорного знания модели ряда, но при этом сравнение этого метода с «модельными» методами показывает хорошие результаты. К преимуществам метода можно также отнести возможность работы с модулированными гармониками, что выгодно отличает его от методов, использующих анализ Фурье.

В основе метода SSA лежит следующий алгоритм [2]. Задав числом $L < N/2$ (длина гусеницы), значениями исходного ряда $F_N = \{f_0, f_1, \dots, f_{N-1}\}$ последовательно заполняют строки матрицы X . При этом первая строка содержит первые L элементов ряда, вторая – со второго элемента по $L+1$ и так далее, пока ряд не исчерпается. Далее находятся собственные числа $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_L$ (в порядке убывания) и соответствующие

собственные векторы U_1, U_2, \dots, U_L матрицы $S = X \cdot X^T$. Сингулярное разложение матрицы X может быть записано, как $X = X_1 + X_2 + \dots + X_d$, где элементарные матрицы X_i вычисляются по формулам $X_i = \sqrt{\lambda_i} U_i \cdot V_i^T$, причем $V_i = X^T \cdot U_i / \sqrt{\lambda_i}$, $d = \max \{i, \lambda_i > 0\}$. Применив к элементарным матрицам X_i процедуру диагонального усреднения, получают временные ряды $F_N^i = \{f_0^i, f_1^i, \dots, f_{N-1}^i\}$, представляющие собой компоненты исходного ряда F_N , такие, что $F_N = F_N^1 + F_N^2 + \dots + F_N^d$.

После группировки компонент по характеру поведения на временной оси с учетом степени вклада каждой в общую сумму получают окончательное разбиение ряда на полезный сигнал \tilde{F}_N и шум $\tilde{\tilde{F}}_N$:

$$F_N = \tilde{F}_N + \tilde{\tilde{F}}_N \quad (1)$$

где $\tilde{F}_N = \tilde{F}_N^1 + \tilde{F}_N^2 + \dots + \tilde{F}_N^m$ представляется в виде суммы тренда, тренд-циклических, циклических и экспоненциально модулированных компонент.

На следующем этапе проводится сравнительный анализ выделенных компонент с другими факторами горного производства с целью выявления скрытых ранее (до разложения) закономерностей. Метод позволяет интерактивно производить непосредственный поиск гармонических и квазипериодических компонент, фильтрацию или сглаживание ряда, выбирая соответствующие значимые компоненты.

Задача прогнозирования полезного сигнала на M шагов вперед в предположении, что ряд \tilde{F}_N допускает продолжение с помощью линейной рекуррентной формулы (ЛРФ), решается при помощи следующего алгоритма рекуррентного прогноза (R-прогноза):

$$g_i = \begin{cases} \tilde{f}_i, & i = 0, \dots, N-1 \\ \sum_{j=1}^{L-1} a_j g_{i-j}, & i = N, \dots, N+M-1, \end{cases} \quad (2)$$

при этом коэффициенты разложения a_j находятся из матрицы

$$R = (a_{L-1}, \dots, a_1)^T = \frac{1}{1-v^2} \sum_{i=1}^d \pi_i P_i^\Delta, \quad (3)$$

где P_1, \dots, P_d – некоторый ортонормированный базис пространства $\aleph_d \subset R^L$, P_i^Δ – вектор, состоящий из первых $(L-1)$ компонент вектора P_i , π_i – последняя компонента вектора P_i , а коэффициент вертикальности v удовлетворяет условию $v^2 = \pi_1^2 + \dots + \pi_d^2 < 1$.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Приведем результаты анализа динамики рядов акустической эмиссии и метанообильности выемочного участка с помощью метода SSA. Для анализа выбраны ряды среднесуточных значений акустической эмиссии и метанообильности 17 орловской

лавы ш. “Молодогвардейская” ОАО Краснодонуголь в период после первичной посадки кровли, включающий 530 точек (рис1).

Визуальный анализ графиков не позволяет выделить характерные периодики, но физическая сущность геомеханических процессов свидетельствует о периодичности, которая отражается акустическими сигналами. Найдем разложение рядов акустической эмиссии и метанообильности на компоненты с помощью сингулярного спектрального анализа SSA.

Исходя из условия делимости компонент, выберем оптимальную длину окна $L=100$. По упорядоченным рядам собственных чисел ковариационных матриц оцениваем количество главных компонент, необходимых для восстановления ряда полезного сигнала. В данном случае оставляем по десять первых значимых компонент, которые объясняют 95% дисперсий исходных рядов. Анализируя одномерные графики компонент, выделяем трендовые компоненты, тренд-циклические и циклические компоненты (рис. 2,3).

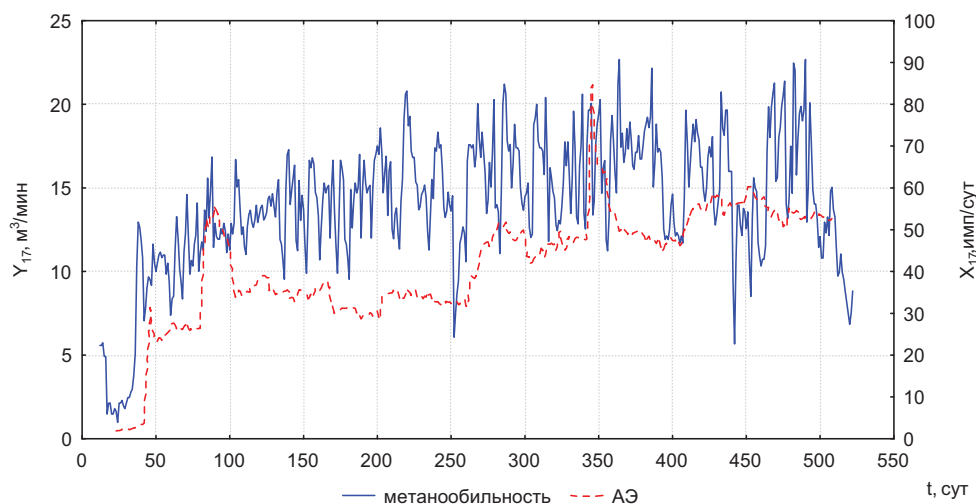


Рис. 1. Динамика акустической эмиссии и метанообильности 17 орловской лавы шахты “Молодогвардейская”

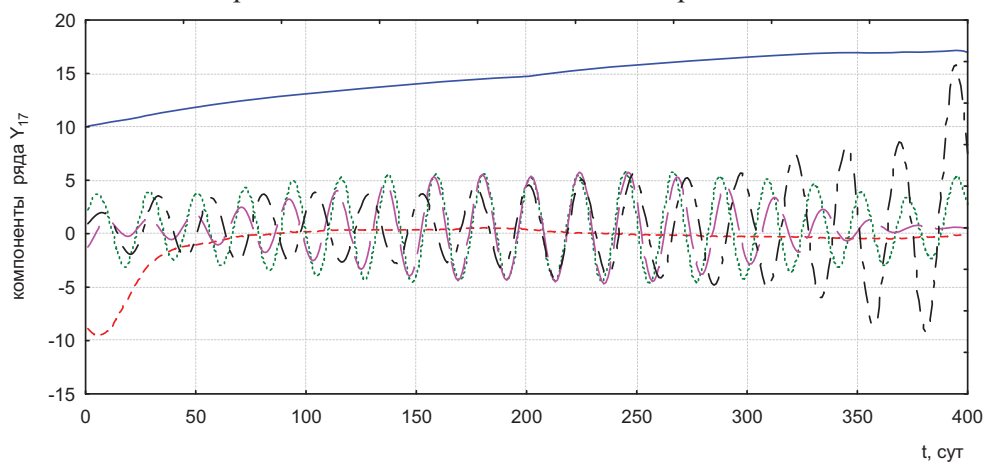


Рис.2. Первые пять компонент разложения ряда метанообильности выемочного участка 17 орловской лавы

С точки зрения безопасности ведения горных работ, важен прогноз динамики ряда метанообильности выемочного участка. Известно [3], что периодические обрушения пород кровли, зафиксированные в ряде акустической эмиссии, формируют периодические всплески метанообильности. Поэтому для прогноза метанообильности важно исследование взаимосвязи этих рядов, которая, прежде всего, проявляется в наличии в двух рядах согласованных по периоду компонент. Согласованность компонент определенных периодов устанавливается с помощью кросс-спектрального анализа. Наиболее высокие коэффициенты когерентности (квадрат корреляции между циклическими компонентами соответствующей частоты) имеют компоненты с периодом 20-22, 34-37, 60-69 суток. Для других периодов коэффициенты когерентности значительно ниже. Кросс-анализ позволяет также определить фазовый сдвиг. Для выделенных гармоник большого периода 19-20, 34 суток отмечается запаздывание ряда метанообильности по отношению к ряду АЭ, которое в среднем составляет 2 суток.

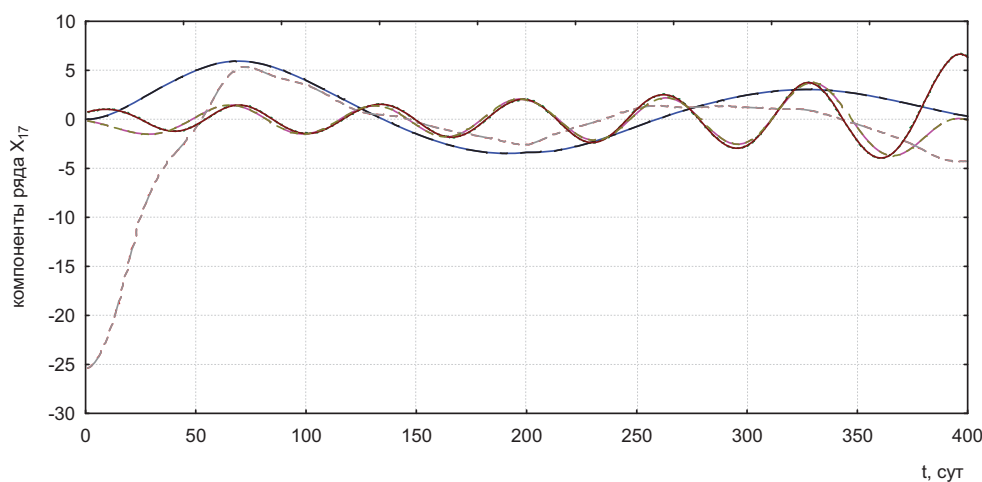


Рис.3. Первые пять компонент разложения ряда АЭ 17 орловской лавы

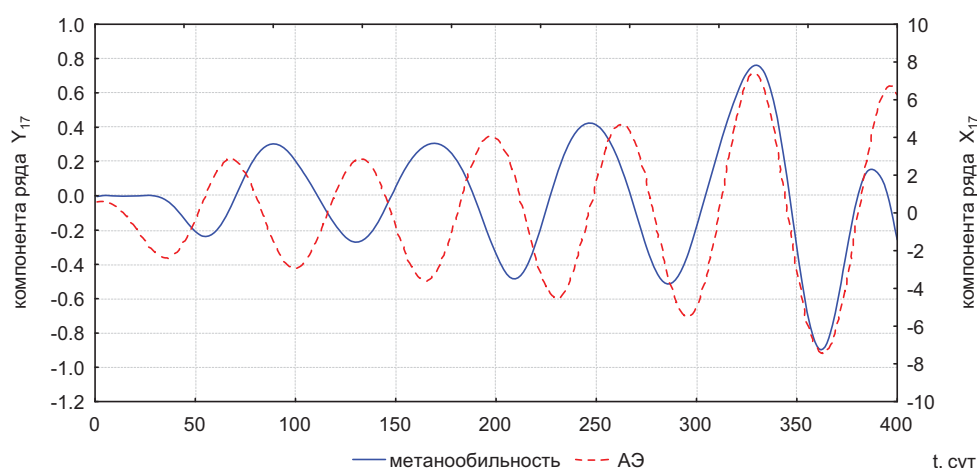


Рис. 4. Компоненты разложения метанообильности и АЭ периодичностью 60-66 суток

В разложении метанообильности присутствует компонента, синхронизированная с компонентой АЭ, периода 60-66 суток (рис. 4) при средней скорости подвигания 2,4-3,2

м/сут это соответствует 180м с задержкой ≈ 3 суток, т.е. в среднем локальные максимумы метанообильности запаздывают по отношению к локальным максимумам АЭ на трое суток.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, наиболее достоверно физическая природа динамики акустической эмиссии и метановыделения моделируется с помощью методов сингулярного спектрального анализа – SSA. Выявлены согласованно изменяющиеся структурные составляющие рядов метанообильности выемочного участка и активности акустической эмиссии. Прогноз ряда акустической эмиссии может быть использован для прогноза ряда метанообильности выемочного участка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Инструкция по безопасному ведению горных работ на пластах опасных по внезапным выбросам угля, породы и газа. М., ИГД им А. А. Скочинского, 1989. 191с.
2. Голяндина Н.Э. Метод «Гусеница»-SSA: анализ временных рядов: Учеб. пособие. СПб: Изд-во СПбГУ, 2004. 76с.
3. Черняк И.Л. Применение гармонического анализа для исследования проявлений горного давления в очистных забоях// Уголь, № 7,1989. – С. 7-10.