

*Канд. техн. наук, доцент Подлипенская Л.Е.
ассистент Бубунец Ю.В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ МЕТАНОВЫДЕЛЕНИЯ ВЫЕМОЧНОГО УЧАСТКА

Проведено дослідження динамічного ряду метановиділення виїмкової ділянки методом “Гусениця”- SSA. Виконано аналіз головних компонентів траєкторної матриці ряду. Отримано розкладення ряду на інформативні компоненти та шуми.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Общеизвестно, что метановыделение в очистных забоях имеет ярко выраженный динамический характер [1]. На практике это приводит к тому, что в разные периоды времени отработки выемочных участков на расстоянии L от разрезной печи наблюдаются резкие колебания значений метановыделения в исходящей струе выемочного участка (рис.1, данные взяты по 26 Орловской лаве ш. “Молодогвардейская” ГКХ “Краснодонуголь”).



Рисунок - 1 Динаміка метановиділення в исходящей струе выемочного участка

В то же время в нормативных документах [2] колебания метановыделения учитываются с помощью усредненного коэффициента неравномерности. Такой подход к учету динамического характера выделения метана не позволяет увязать его с соответствующим периодом времени и пространственным положением лавы относительно разрезной печи. Кроме этого, использование усредненных значений колебания метановыделения зачастую ведет к необоснованному занижению расчетных значений нагрузки на очистной забой и негативно сказывается на принятии решений по внедрению современных высокопроизводительных механизированных комплексов.

Авторам представляется актуальной проблема создания математической модели, на основе современных теорий моделирования, для описания динамики метановыделения и позволяющей выявлять и разделять закономерные и случайные составляющие процесса выделения метана, увязывая их с влиянием геологических и технологических факторов. На этой основе открывается возможность существенно повысить надежность прогнозов абсолютного и относительного выделения метана в очистных забоях и разрабатывать рекомендации по управлению этим процессом. Решение указанных задач требует применения специальных методов, позволяющих описывать динамические процессы.

Анализ исследований и публикаций. В настоящее время существует множество методов, так или иначе решающих проблемы, связанные с моделированием процессов, содержащих регулярные составляющие. Анализ временных рядов (в данном случае по регулярной компоненте L) предполагает, что данные содержат систематическую составляющую (обычно включающую несколько компонент) и случайный шум, который затрудняет обнаружение регулярных компонент. В общем случае временной ряд рассматриваемого в примере типа, можно представить себе состоящим из четырех различных компонент: сезонной компоненты S_L , тренда T_L , циклической компоненты C_L и случайной, нерегулярной компоненты или флуктуации E_L . Разница между циклической и сезонной компонентой состоит в том, что последняя имеет регулярную (сезонную) периодичность, тогда как циклические факторы обычно имеют более длительный эффект, который к тому же меняется от цикла к циклу. Большинство методов исследования временных рядов включает различные способы фильтрации шума, позволяющие увидеть регулярную составляющую более отчетливо. Это методы спектрального анализа [3], ARIMA-модели [4], методы сезонной декомпозиции [5] и др. Недостатками одних методов является неудовлетворительная реконструкция разлагаемого сигнала, других – требование идентификации модели на предварительном этапе, что уменьша-

ет гибкость создаваемых моделей. Нами предлагается использовать современный метод моделирования временных рядов под названием “Гусеница”-SSA [6]. Этот свободный от модели метод, предназначенный для исследования структуры временных рядов и их прогнозирования, совмещает в себе достоинства многих других методов, в частности, анализа Фурье и регрессионного анализа. Вместе с тем он отличается простотой и наглядностью в управлении. Метод разрабатывался независимо в России, Великобритании и США под разными именами – “Гусеница” и SSA (Singular Spectrum Analysis) [7].

Постановка задачи. Изучить возможности применения метода “Гусеница” в задачах исследования динамики метановыделения в исходящей струе выемочного участка.

Изложение материала и его результаты.

Базовый вариант метода состоит в преобразовании одномерного ряда в многомерный с помощью однопараметрической сдвиговой процедуры (отсюда и название "Гусеница"), исследовании полученной многомерной траектории с помощью анализа главных компонент (сингулярного разложения) и восстановлении (аппроксимации) ряда по выбранным главным компонентам. Таким образом, результатом применения метода является разложение временного ряда на простые компоненты: медленные тренды, сезонные и другие периодические или колебательные составляющие, а также шумовые компоненты. Полученное разложение может служить основой прогнозирования как самого ряда, так и его отдельных составляющих.

Применим метод "Гусеница" к динамическому ряду метановыделения q_L (рис.1). Для удобства рассмотрения графиков, представленного фрагмента выемочного участка, приведем расстояние от разрезной печи до начальной точки $L=460$ к 0, т.е. $l=L-460$. В качестве лаговой переменной служит величина l , дискретизированная с шагом 1 м. Обозначим получившийся динамический ряд $F = (f_0, f_1, \dots, f_{N-1})$. Параметры модели: длина ряда $N=453$; длина гусеницы $M=228$; $k=N-M+1=226$. Траекторная матрица X состоит из векторов вложения в качестве столбцов, полученных из ряда F . Корреляционная матрица для сформированного массива X представлена в графическом виде на рис. 2 (чем темнее раскраска, тем больше корреляция между факторами).

При явной периодичности должны быть темные полосы с интервалом, равным периоду. Для данной матрицы такая закономерность не наблюдается. Следовательно, наша периодичность носит скрытый характер.

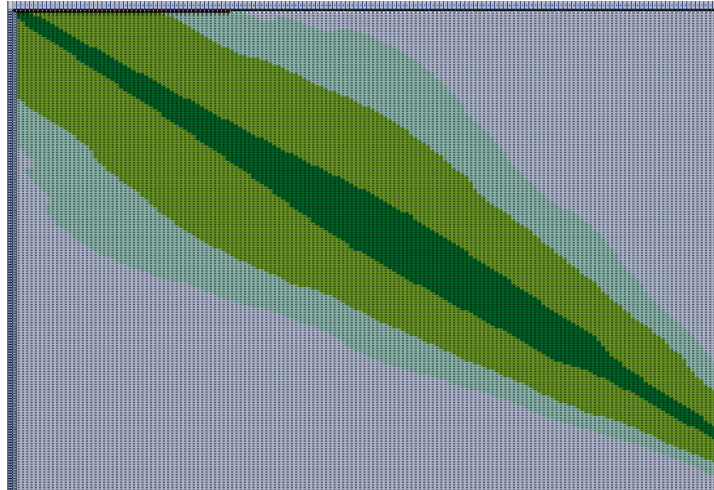


Рисунок - 2 Корреляционная матрица

Следующим шагом метода "Гусеница" является анализ главных компонент. В качестве первого результата АГК на рис.3 представлены собственные числа ковариационной матрицы $S = X \cdot X^T$.

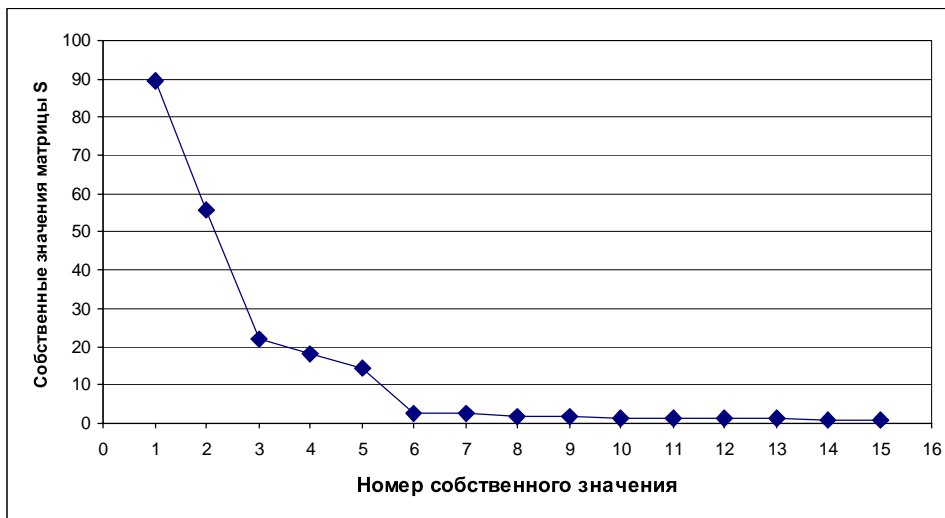


Рисунок - 3 Собственные числа ковариационной матрицы

По этому рисунку можно предположить, сколькими главными компонентами описывается данный ряд. Например, можно говорить о том, что после приблизительно 10–15 главной компоненты находится шум (равномерное убывание очень маленьких собственных чисел). Метод "Гусеница" предполагает так же другие критерии. Так как одной синусоидальной составляющей соответствует в идеальной ситуации две главные компоненты с одинаковым периодом ("синус" и "косинус"),

соответствующие одному собственному числу, то в реальной ситуации эти две главные компоненты соответствуют близким собственным числам. Поэтому на графике можно увидеть "ступеньку". Такие ступеньки могут быть и для маленьких собственных чисел. На рис.3 наиболее заметны "ступеньки", соответствующие ГК 4–5 и 6–7, хотя последняя пара практически незначима.

Процедура "Гусеница" порождает набор линейных фильтров, настроенных на составляющие исходного процесса. При этом собственные векторы матрицы S выступают в роли переходных функций соответствующих фильтров. Визуальное и аналитическое изучение, как собственных векторов U_i , так и главных компонент Y_i , полученных в результате линейной фильтрации, может дать много интересной информации о структуре изучаемого процесса и свойствах составляющих его слагаемых. На рис.4 – 6 представлены одномерные графики собственных векторов (по координатно) и главных компонент Y_i (по лаговой переменной), которые дают представление о характере поведения соответствующих им компонент исходного ряда.

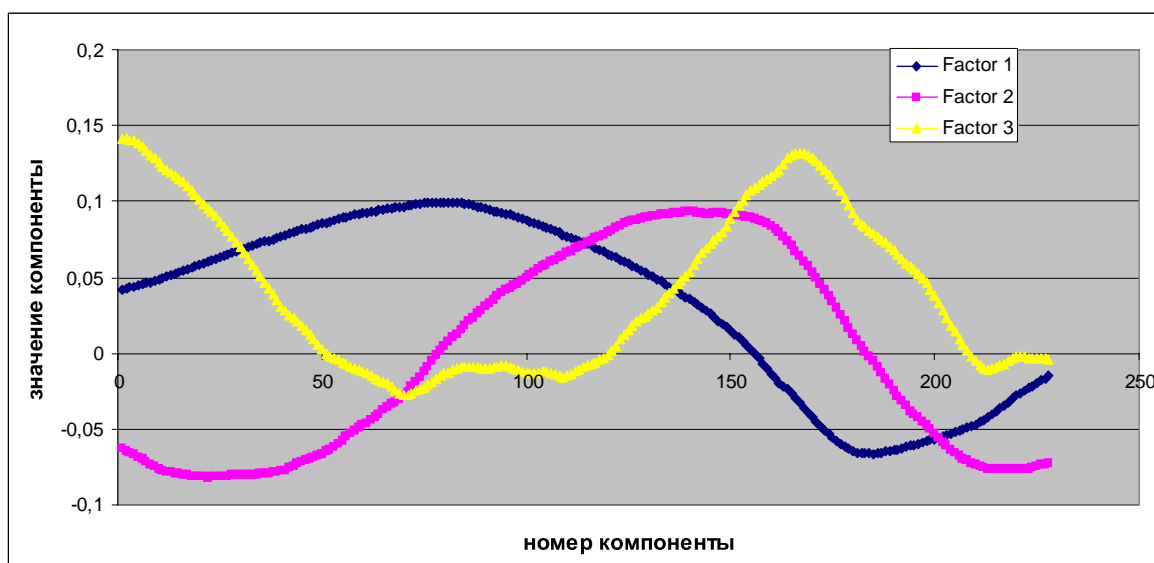


Рисунок - 4 Собственные векторы для ГК 1, 2, 3

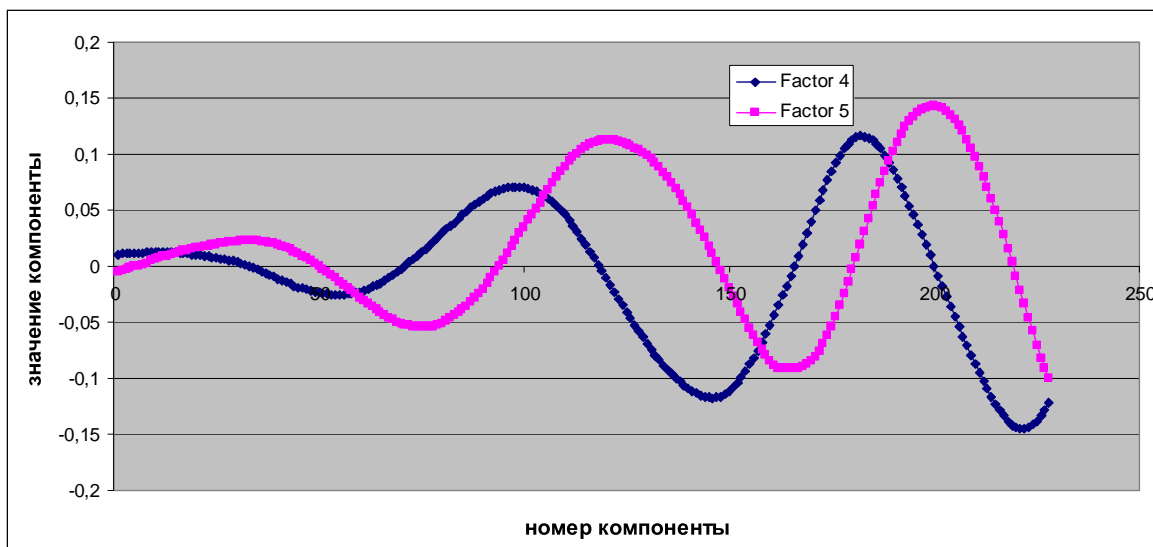


Рисунок - 5 Собственные векторы для ГК 4, 5

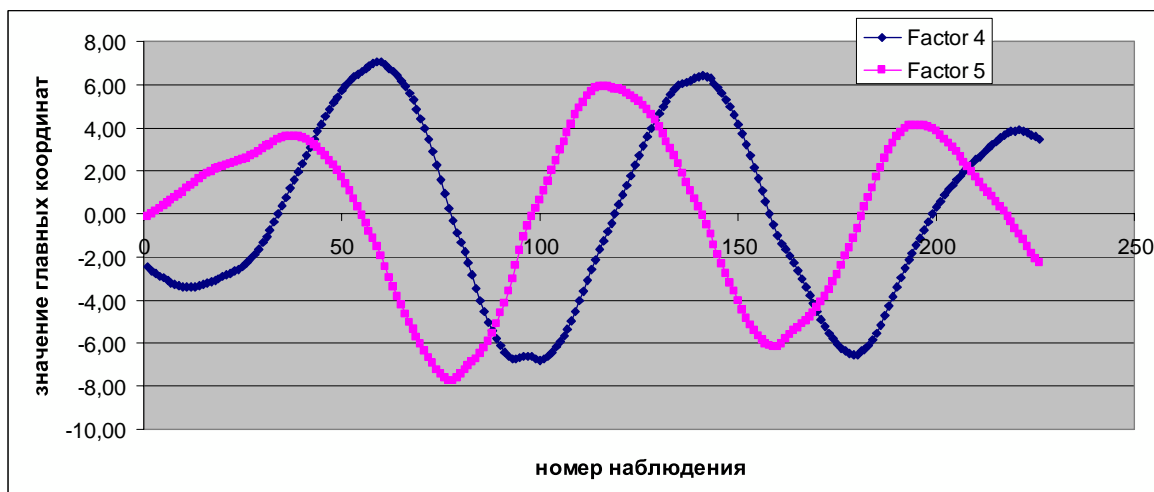


Рисунок - 6 Главные компоненты ГК 4,5 в динамике

Визуальный анализ графиков показывает, что первые три главные компоненты могут относиться как к тренду, так и к низкочастотной составляющей (что формально неразличимо). Здесь мы отнесем их к тренду. Пара ГК 4 и 5 говорят о сезонной компоненте с периодом примерно 80 м. (рис. 5), правда с раскачивающейся амплитудой, что может свидетельствовать как о нестационарности процесса, так и том, что в пару ГК 4 и 5 вошла часть тренда. Рис. 6 позволяет лучше увидеть данную скрытую периодичность. Анализ аналогичных графиков для пары ГК 6 и 7 не подтверждает (на основании собственных векторов) наличие сезонности, связанной с этой парой. Это, возможно, связано с ложной периодичностью или нестационарностью поведения данных компонент.

Для облегчения разбиения главных компонент по парам служат двумерные графики собственных векторов (рис.7а-е).

Так как двумерное изображение синуса и косинуса образует единичную окружность, то гармоническая составляющая с целым периодом изображается в виде правильного многоугольника с числом вершин, равным величине периода. Такого графика мы не выявили. При изменении амплитуды многоугольник превращается в спираль (рис.7г). Это подтверждает сезонность, выявленную парой ГК 4 и 5, с увеличивающейся амплитудой (поскольку спираль раскручивается). График рис.7а подтверждает тренд-циклическую природу ГК 1–2, в то время как ГК 3 лишено признаков цикличности. Эту компоненту можно отнести к тренду.

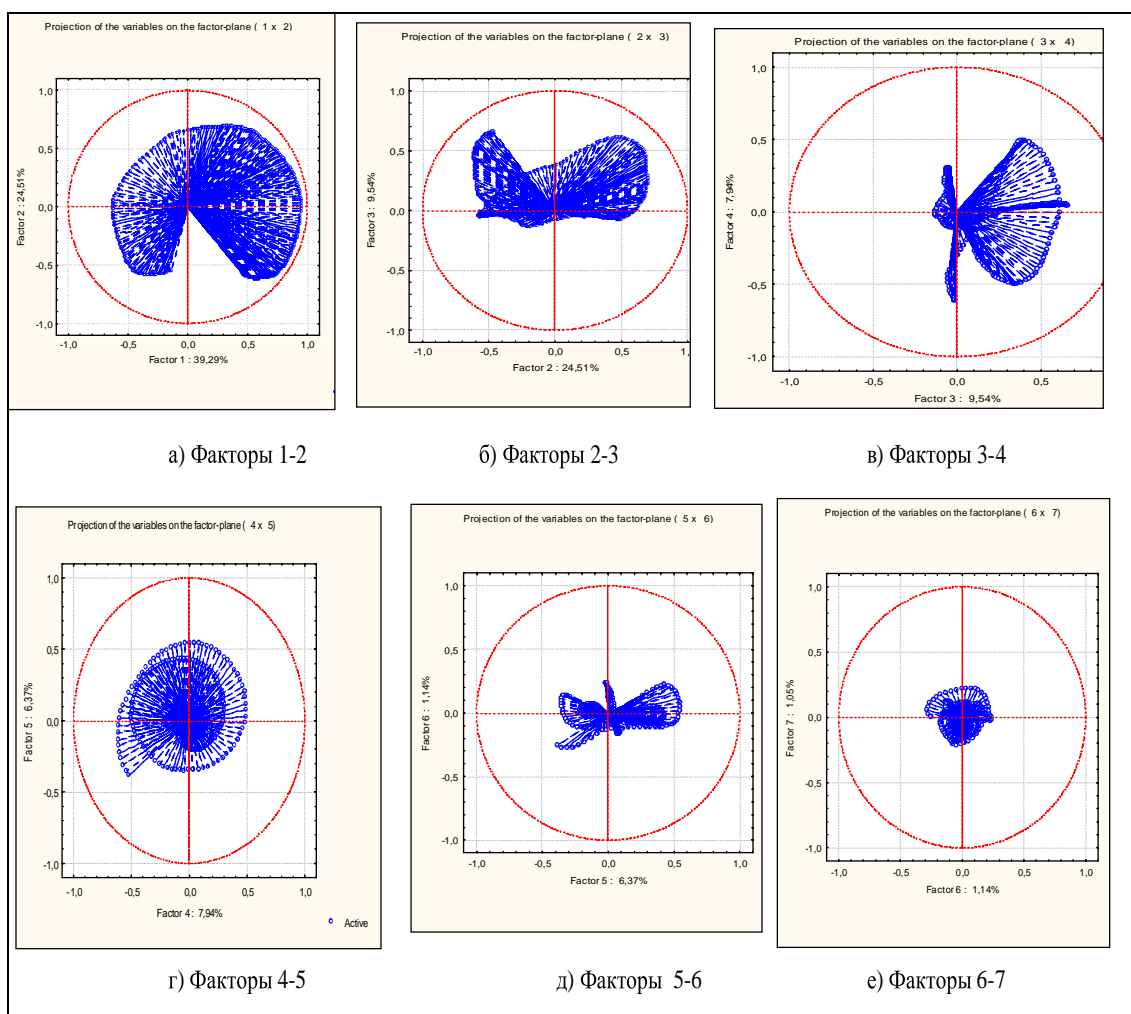


Рисунок - 7 Двухмерные графики пар главных компонент

Воспользовавшись приведенным выше анализом, проведем восстановление ряда по разным наборам главных компонент (рис. 8-9).

Наиболее приемлемое сочетание простоты модели и точности прогноза дает восстановление исходного ряда по первым пяти компонентам (рис.9).

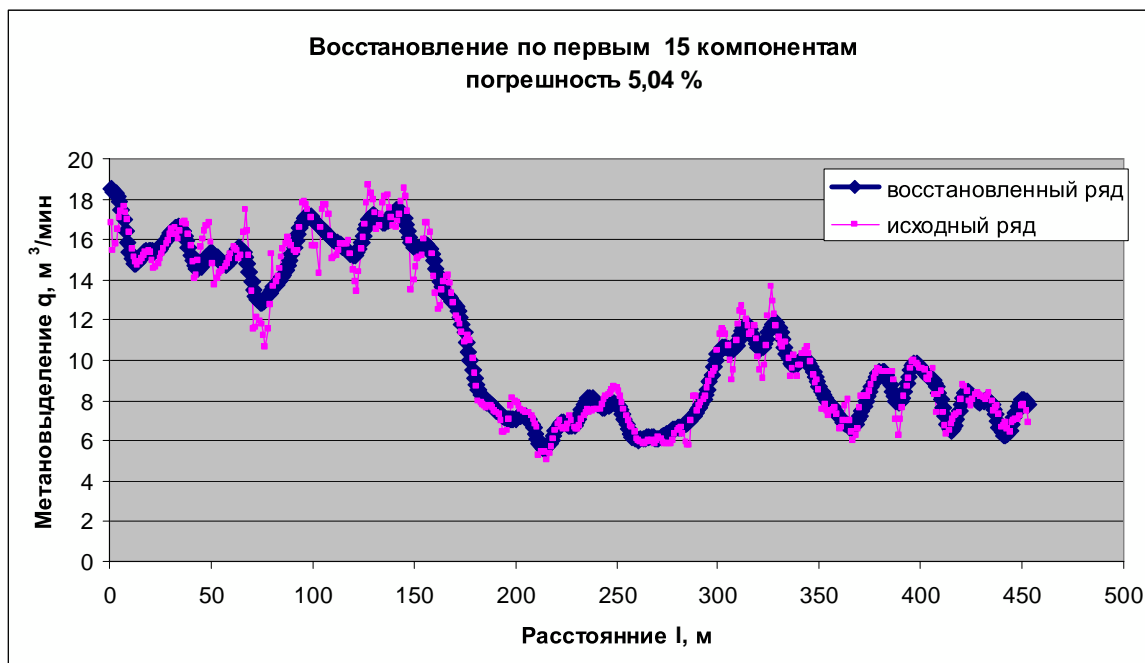


Рисунок - 8 Исходный и восстановленный по ГК 1–15 динамические ряды

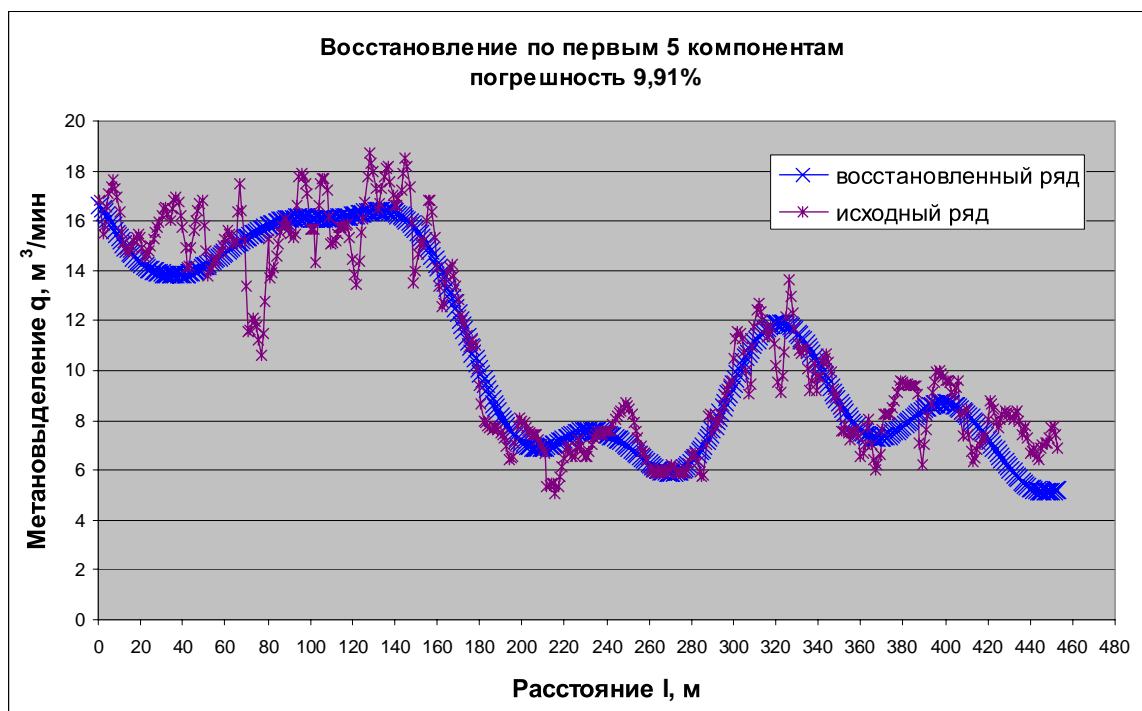


Рисунок - 9 Исходный и восстановленный по ГК 1–5 динамические ряды

При исследовании динамики метановыделения наибольший интерес представляет не только конечное восстановление динамического ряда, но и разложение ряда на компоненты, дающее возможность интерпретировать каждую отдельную составляющую как отклик исследуемого показателя на изменение факторов горного производства (как горно-геологического, так и технологического характера). Для этой цели используем сингулярное разложение матрицы X :

$X = X_1 + \dots + X_d$, где $X_i = \sqrt{\lambda_i} \cdot U_i \cdot V_i^T$ – i -ая компонента разложения; (λ_i, U_i, V_i^T) – i -ая собственная тройка сингулярного разложения; λ – собственное значение компоненты; U, V – соответственно левые и правые сингулярные векторы разложения ковариационной матрицы.

Оставляя только пять первых компонент и группируя их (ГК 1-3 для тренд-циклической компоненты; ГК 4-5 для сезонной компоненты), получим следующее разложение для восстановленного ряда: $F^{восст} = F_1^{1,2,3} + F_2^{4,5}$ (рис. 10).

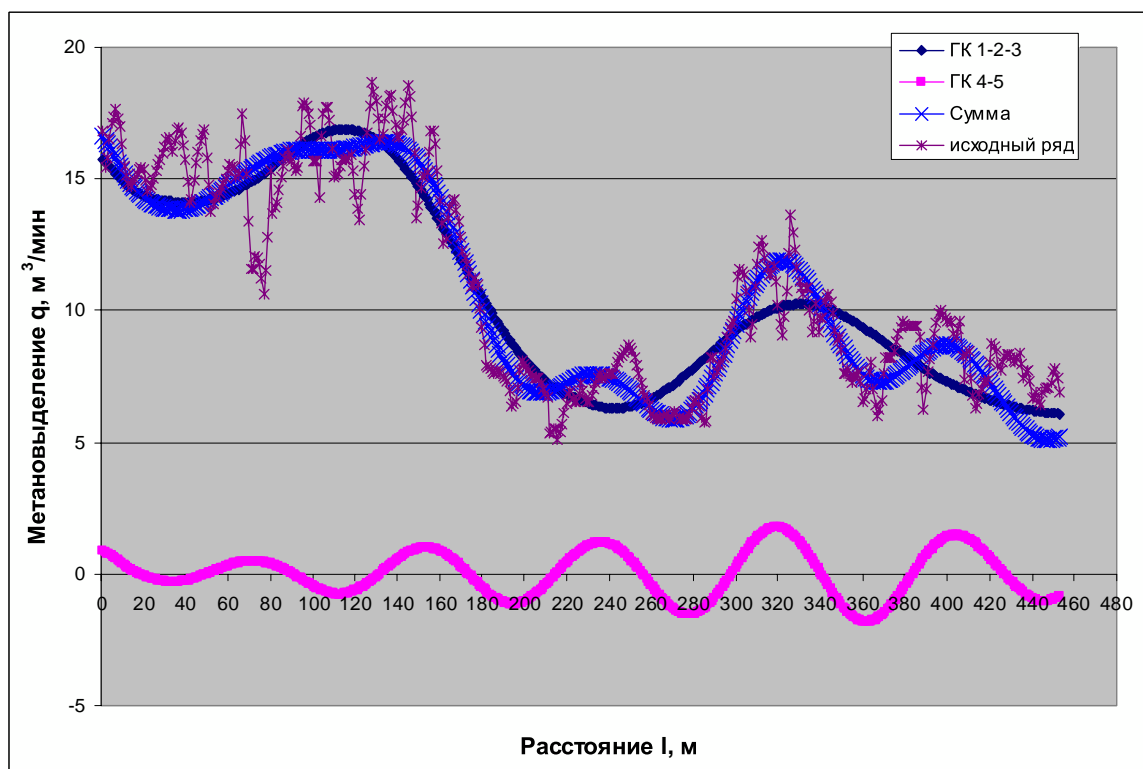


Рисунок – 10 Графики разложения динамического ряда

Высокочастотные колебания исследуемого признака, выявленные по парам ГК 6-7 и ГК 8-9, не вошедшие в окончательную модель могут быть результатом шума или дискретизации данных (шаг 1м). Поэтому если для низкочастотных составляющих обычно решается вопрос о том,

что это – тренд или периодика, то для высокочастотных составляющих должен ставиться вопрос об их случайности. В данном случае остатки прошли тест на независимость, случайность и нормальность, и это еще раз подтверждает правильность выбранной модели.

Анализируя полученное разложение, можно сделать вывод о наличии в динамике метановыделения долгосрочного тренда $F_1^{1,2,3}$ с резким изменением поведения в середине ряда и сезонной компоненты $F_2^{4,5}$ с периодом 80 м, показывающей цикличность отклонений метановыделения от тренда.

Выводы и направление дальнейших исследований. Данная работа показала эффективность применения метода “Гусеница”- SSA к задачам выявления структуры и выделения периодичностей для динамических рядов метановыделения выемочных участков. Результатом применения метода является разложение ряда на простые интерпретируемые компоненты. Таким образом, появляется возможность выделить из изучаемого ряда информативную часть и отбросить шумы, что позволит сделать анализ факторов влияющих на метановыделение, определяя степень их влияния и периодичность. Следующим этапом может быть прогноз как для восстановленного ряда с помощью бутстреп-доверительных интервалов, так и исходного динамического ряда.

Проведено исследование динамического ряда метановыделения выемочного участка методом “Гусеница”- SSA. Выполнен анализ главных компонент траекторной матрицы ряда. Получено разложение ряда на информативные компоненты и шумы.

The investigation of dynamic range of methane emission of production site by method of “Caterpillar” – SSA was performed. The analysis of main components of trajectory of range matrix is made. Range breakdown into informative components and noise is given.

Библиографический список:

1. *Метан в угольных пластах от образования до выделения: Монография/ Н.И. Антощенко, В.Д. Шепелевич. – Алчевск: ДонГТУ, 2006. – 267 с.*
2. *Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. – К.: Основа, 1994. – 312 с.*
3. *Четыркин Е.М. Статистические методы прогнозирования. – М.: Статистика, 1977. – 272 с.*
4. *Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление/Пер. с англ./ М.: Мир, 1974, вып. 1 и 2.*

5. *Эконометрика: Учебник/Под. ред.. И.И. Елисейевой.* – М.: Финансы и статистика, 2001. – 344 с.

6. *Голяндина Н.Э. Метод «Гусеница»-SSA: анализ временных рядов: Учеб. пособие.* СПб: Изд-во СПбГУ, 2004. 76 с.

7. *Elsner J.B. and Tsonis A.A. Singular Spectrum Analysis. A New Tool in Time Series Analysis.* New York and London: Plenum Press, 1996. 164 p.