

# Разработка нового подхода к анализу данных сложных систем: исследование синхронизации в динамике показателей солнечной активности

В.А. Юнусов<sup>1</sup>, С.А. Демин<sup>1</sup>, С.Ф. Тимашев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Казанский федеральный университет, Кремлевская 18, Казань, Россия, 420008

<sup>2</sup>Научно-исследовательский физико-химический институт им Л.Я. Карпова, Воронцово поле 10, Москва, Россия, 105064

## Аннотация

В настоящей работе разрабатывается новый подход к изучению эффектов согласования и рассогласования в одновременно фиксируемых временных сигналах, характеризующих эволюцию природных систем. Обсуждаются затруднения в разработке методов интеллектуального анализа данных, генерируемых сложными составными объектами. На основе основных положений и понятий фликкер-шумовой спектроскопии проводится исследование частотно-фазовой синхронизации в динамике чисел Вольфа и корональных выбросов Солнца. Эволюция коллективных процессов, протекающих в атмосфере Солнца, представлена в изменениях формы кросс-корреляторов. Для оценки причинно-следственных связей между показателями солнечной активности рассчитаны количественные структурные показатели кросс-корреляторов. Устанавливаемые уровни перекрестных корреляций в термодинамически открытых распределенных системах, например Солнца, могут стать объектом стандартизации. Комбинированное сочетание фликкер-шумовой спектроскопии с математическими моделями и программными средствами машинного обучения позволит продвинуться в понимании коллективных явлений, реализуемых в сложных системах.

## Ключевые слова

Науки о данных, сложные системы, фликкер-шумовая спектроскопия, коллективные явления, перекрестные корреляции, солнечная активность, числа Вольфа, корональные выбросы Солнца

## 1. Введение

В настоящее время интеллектуальный анализ экспериментальных данных с привлечением методов машинного обучения для выявления и обработки информации, позволяющим принимать оптимальные решения, является наиболее актуальным в исследованиях эволюции сложных систем. Структурные и динамические свойства сложных систем, такие как: неравновесность, нелинейность, перемежаемость, самоорганизация, обусловлены, прежде всего, их высокой размерностью или взаимодействием большого числа элементов. Сложность в количественном и качественном описании указанных свойств дополняется коллективными явлениями и процессами, реализуемыми в природных объектах. Разработка новых теоретических подходов в дополнение к традиционным методам машинного обучения: нейронные сети, генетические (эволюционные) алгоритмы, построение деревьев принятия решений, метод опорных векторов, позволит продвинуться в понимании эмерджентных свойств сложных систем.

В настоящей работе мы проводим анализ взаимной динамики показателей сложных систем на основе изучения перекрестных корреляций, т.е. вероятностных связей между двумя временными рядами динамических переменных. Исследование эффектов синхронизации в

динамике показателей солнечной активности осуществляется в рамках фликкер-шумовой спектроскопии (ФШС).

## **2. Фликкер-шумовая спектроскопия, как возможный вариант для интеллектуального анализа экспериментальных данных**

Существуют разные методы изучения эффектов согласования в динамике сложных систем. Следует выделить концепции фазовой и частотной синхронизаций, которые основаны на выявлении характерных частот и разности фаз сигналов, генерируемых частями сложной системы. Частоты и фазы колебаний устанавливаются в рамках моделей аналитических сигналов, полученных с помощью преобразований Фурье и/или вейвлет-преобразования, Гильберта. Также изучается стохастическая или обобщенная синхронизация, суть которой заключается в сопоставительном анализе топологической структуры аттракторов, синхронизация временных масштабов (лаг-синхронизация, перемежающая синхронизация).

Изучение самоорганизации намагниченной плазмы и формирования устойчивых магнитных солнечных структур является сложной задачей современной астрофизики, решение которой должно включать учёт эффектов синхронизации. Анализ эффектов синхронизации во взаимной динамике показателей солнечной активности выполняется нами на основе ФШС [1, 2]. Исследование перекрестных корреляций проводится для цюрихского ряда и корональных выбросов Солнца на длине волны 330.3 нм [3].

Отмечено, что ключевая роль в причинно-следственных связях рассматриваемых сигналов принадлежит числам Вольфа. Приведено количественное описание кросс-корреляций для разных временных периодов 11-летнего цикла солнечной активности. Таким образом, сложные по своей природе процессы, определяющие выбросы солнечной энергии: эволюция чисел Вольфа, которая основана на образовании солнечных пятен в результате неустойчивости магнитного давления, крупномасштабное магнитное поле в конвективной зоне, которое подвержено сильной турбулентной диффузии, корональные выбросы массы и солнечные вспышки, должны анализироваться как многопараметрический корреляционный процесс.

## **3. Заключение**

В настоящей работе обсуждаются результаты исследования эффектов частотно-фазовой синхронизации между разными показателями солнечной активности. Приведены основные положения и понятия ФШС, применяемой для решения трех типов задач: параметризации отдельных сигналов, поиска предикторов резких изменений в эволюции исследуемых объектов и обнаружения эффектов согласования в одновременно фиксируемых рядах экспериментальных данных. Изучается как информация, заложенная в резонансных частотах, так и параметры, характеризующие высокочастотные вклады. Представленные результаты указывают на возможный путь развития интеллектуального анализа наблюдательных космических данных в идентификации астрофизических объектов.

## **4. Благодарности**

Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 20-12-00105). Экспериментальные данные представлены в свободном доступе в сети Интернет.

## **5. Литература**

- [1] Timashev, S.F. Flicker-Noise Spectroscopy: Information in Chaotic Signals / S.F. Timashev. – Moscow: Fizmatlit, 2007. – 248 p.

- [2] Timashev, S.F. Frequency and phase synchronization in neuromagnetic cortical responses to flickering-color stimuli / S.F. Timashev, Yu.S. Polyakov, R.M. Yulmetyev, S.A. Demin, O.Yu. Panischev, S. Shimojo, J. Bhattacharya // *Laser Physics*. – 2010. – Vol. 20(3). – P. 604-617.
- [3] Rušin, V. The Green Corona and Magnetic Fields / V. Rušin, M. Rybanský // *Solar Physics*. – 2002. – Vol. 207. – P. 47-61.