

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра нелинейной физики

**Использование запрещенных паттернов перестановки для  
различения временных рядов шумовой и хаотической природы**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 4011 группы

направления 03.03.01 Прикладные математика и физика  
код и наименование направления (специальности)

Институт физики

наименование факультета, института, колледжа

Корнеевца Максима Леонидовича

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

доцент, к.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

  
дата, подпись

А. Б. Адилова

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой нелинейной физики

к.ф.-м.н., доцент

должность, уч. степень, уч. звание

  
дата, подпись

Е. Н. Бегинин

инициалы, фамилия

Саратов 2023 год

## Введение

Создание методов для различения сигналов разной природы является актуальной проблемой для физиков. Точный анализ временных рядов позволяет избегать неблагоприятных событий, таких как развитие болезней в организме, поломку механических устройств, а также обеспечение безопасности<sup>1</sup>. Проблема заключается в том, что ныне существующие методы анализа временных рядов<sup>2,3</sup> в ряде случаев дают не полную или не достоверную информацию. Альтернативный метод анализа временных рядов был предложен учеными Vandt и Pompe<sup>4</sup>, который основан на расчете энтропии перестановок. После многочисленных экспериментов метод зарекомендовал себя во многих областях<sup>5,6</sup>

Целью работы является создание метода анализа временных рядов, который способен различать шумовую и хаотическую компоненты.

Для достижения вышеуказанной цели необходимо решить следующие конкретные научные задачи:

- Создание программы для анализа временных рядов с использованием запрещенных паттернов перестановки на языке программирования Python<sup>7</sup>
- Генерация тестовых временных рядов хаотической природы с дискретным и непрерывным временем и их анализ с использованием созданной программы.
- Генерация временных рядов с шумом различной природы (белого, фиолетового и броуновского) и разной амплитуды. Исследование динамики численности запрещенных паттернов перестановки в шумовых временных рядах.
- Развитие метода поиска запрещенных паттернов во временной реализации для различения шумовых и хаотических компонент во временном ряде.

- Анализ временных рядов с аддитивным добавлением шума разной природы и амплитуды во временные ряды с дискретным и непрерывным временем. Определение амплитуды шума, которую способен распознать созданный метод.
- Анализ влияния величины порядка паттерна перестановки на количество запрещенных паттернов в исследуемой временной реализации и на время, затрачиваемое на работу программы. Формулировка оптимальных параметров паттернов перестановки для различения шумовой и хаотической компоненты в исследуемой временной реализации.

### **Метод анализа временных рядов на основе поиска паттернов перестановки**

Перестановки, они же паттерны, определяют, сколькими различными способами можно переупорядочить элементы множества, не меняя их количество.

Количество всех возможных паттернов есть факториал порядка паттерна  $n$ :

$$P = n!$$

Пример для  $n=3$ :

$$P = 1 \times 2 \times 3 = 6$$

Найденные паттерны представляют собой интервалы, состоящие из набора чисел от 1 до  $n$ .

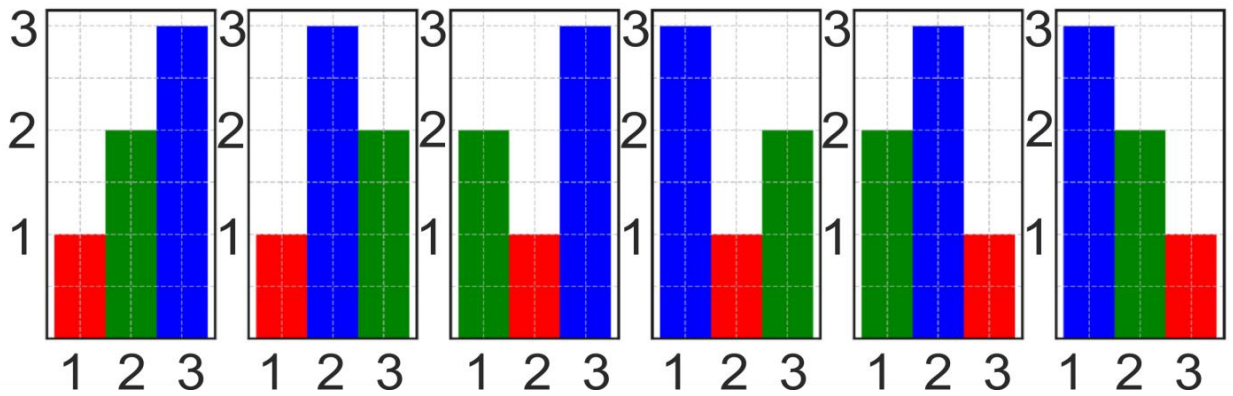


Рисунок 1. Визуализация паттернов порядка  $n=3$

На рисунке 1 изображен некоторый временной ряд, состоящий из точек:  $x=[4,7,9,10,6,11,3]$

Также мы имеем перестановки паттернов с порядком  $n=3$ :

$$(1,2,3),(1,3,2),(2,1,3),(3,1,2),(2,3,1),(3,2,1)$$

Если анализировать данный временной ряд, используя паттерны с порядком 3, то получается, что мы встретим лишь паттерны:

$$(1,2,3),(2,1,3),(2,3,1)$$

И не встретим паттернов:

$$(1,3,2),(3,1,2),(3,2,1)$$

Паттерны, которые не были найдены, являются **запрещенными** для выбранного участка временно реализации исследуемой системы, и никогда не будут обнаружены в нем, что говорит нам о **существовании определенного закона**, которому подчиняется данный участок временного ряда<sup>8</sup>.

На рисунке 2 изображен временной ряд  $x=[4,7,9,10,6,11,3]$ . Цветными линии – паттерны.

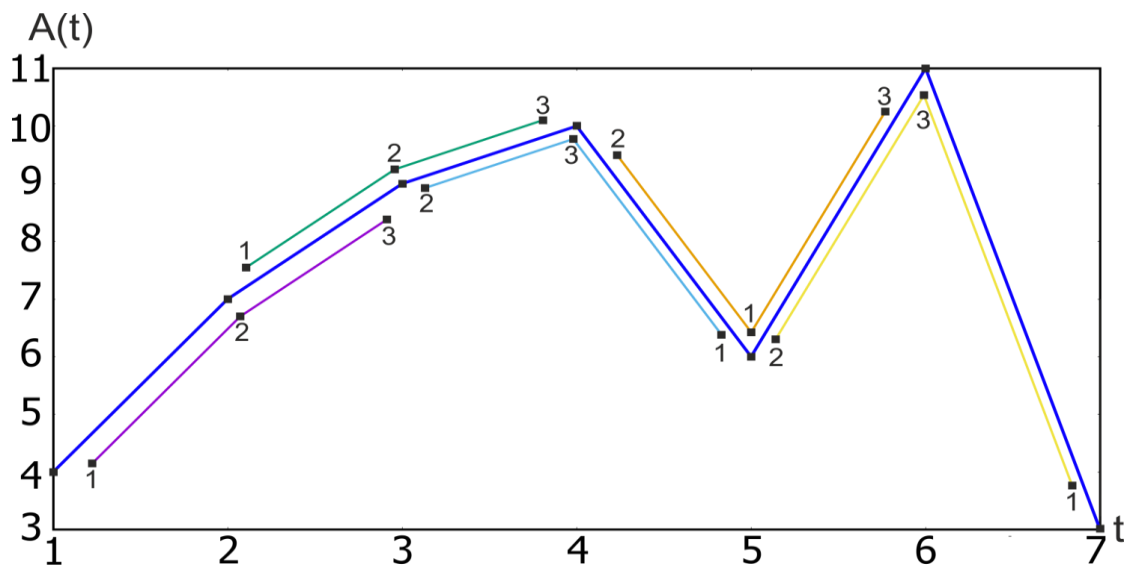


Рисунок 2. График анализируемого временного ряда, цветные линии представляют паттерны, относящиеся к соответствующим интервалам временного ряда

### Временные ряды с дискретным временем. Логистическое отображение

Хаотическая динамика с дискретным временем была получена с помощью логистического отображения:

$$x_{n+1} = Lx_n(1 - x_n)$$

Где  $L$  – параметр определяющий динамику системы (от периодической до хаотической), для создания хаотической динамики брались значения  $3.5 \leq L \leq 4$ ,  $x_n$  принимает значения от 0 до 1.

На рисунке 3 представлен график хаотической динамики. Несмотря на то что он очень похож на график шума, анализ методом поиска запрещенных перестановок показывает, что хаотические временные ряды подчиняются определенному закону, который указывает на существование конечного конкретного числа запрещенных паттернов.

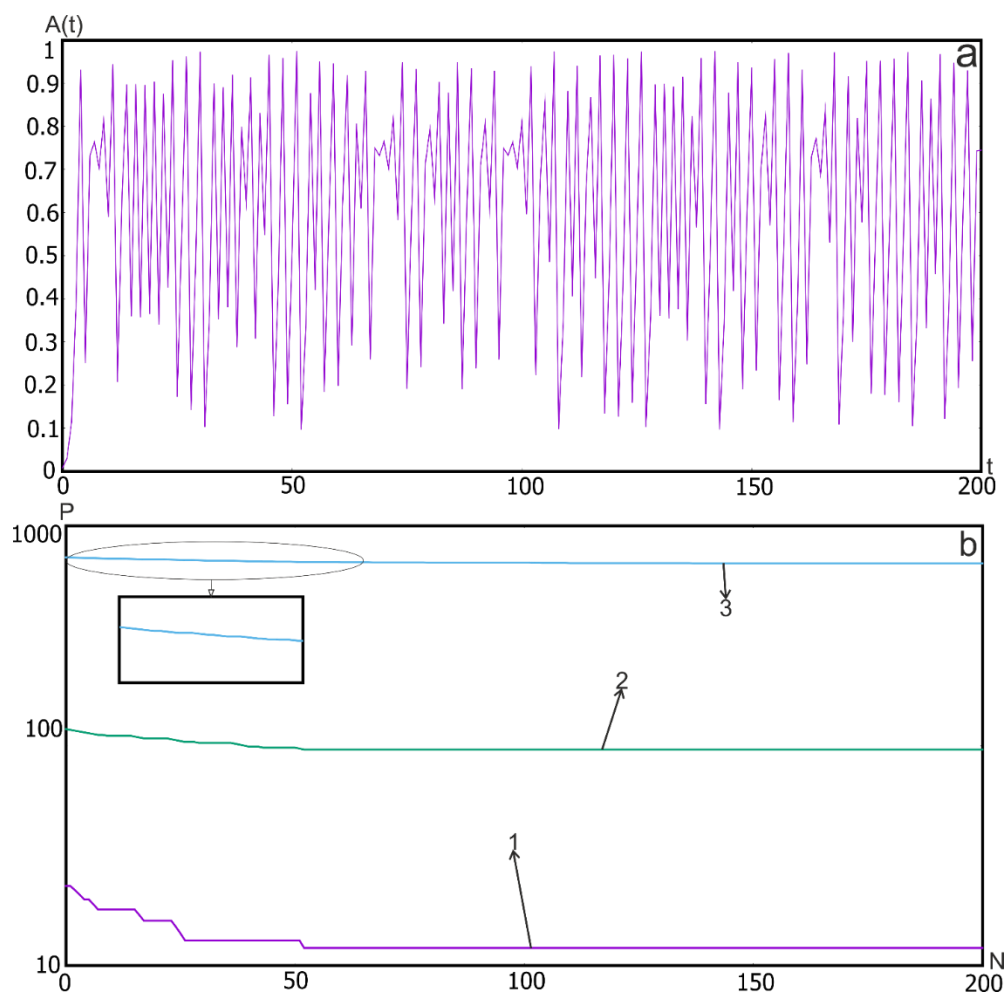


Рисунок 3. Хаотическая динамика (дискретное время): а - исследуемый временной ряд; б - график зависимости количества запрещенных паттернов перестановок P от длины временного ряда (двойная логарифмическая шкала), где цифрами обозначены различные порядки паттернов n: 1 - n=4; 2 - n=5; 3 - n=6.

### Временные ряды с непрерывным временем. Система Лоренца.

Хаотическая динамика с непрерывным временем была получена с помощью системы Лоренца:

$$\frac{dx}{dt} = s * (y - x)$$

$$\frac{dy}{dt} = r * x - y - x * z$$

$$\frac{dz}{dt} = x * y - b * z$$

Где s=16.4, r=45.92, b=4 – значения переменных, задающих шумовую динамику

Использовалась координата  $z$ , а уравнение решалось с помощью метода Рунге-Кутты 4 порядка.

На рисунке 4, как и в случае с логистическим отображением на 1й взгляд график а похож на график шума, но анализ созданным методом показывает, что в данная система подчиняется какому-то закона.

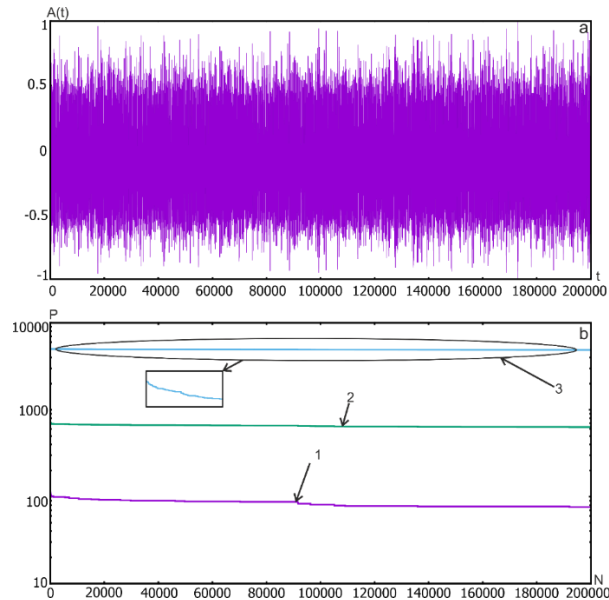


Рисунок 4. Хаотическая динамика(непрерывное время): а - исследуемый временной ряд; б - график зависимости количества запрещенных паттернов перестановок  $P$  от длины временного ряда, где цифрами обозначены различные порядки паттернов  $n$ : 1 -  $n=5$ ; 2 -  $n=6$ ; 3 -  $n=7$ .

Случай хаотической динамики с непрерывным временем почти не отличается от случая с дискретным временем – отличие лишь в том, что запрещенные паттерны дольше набираются.

### **Временные ряды с шумовой природой. Белый, фиолетовый и броуновский шум.**

Были сгенерированы временные ряды шумовой природы: фиолетовый шум, броуновский и белый. На рисунке 5 виден результат анализа временных рядов, полностью состоящих из шума разной динамики.

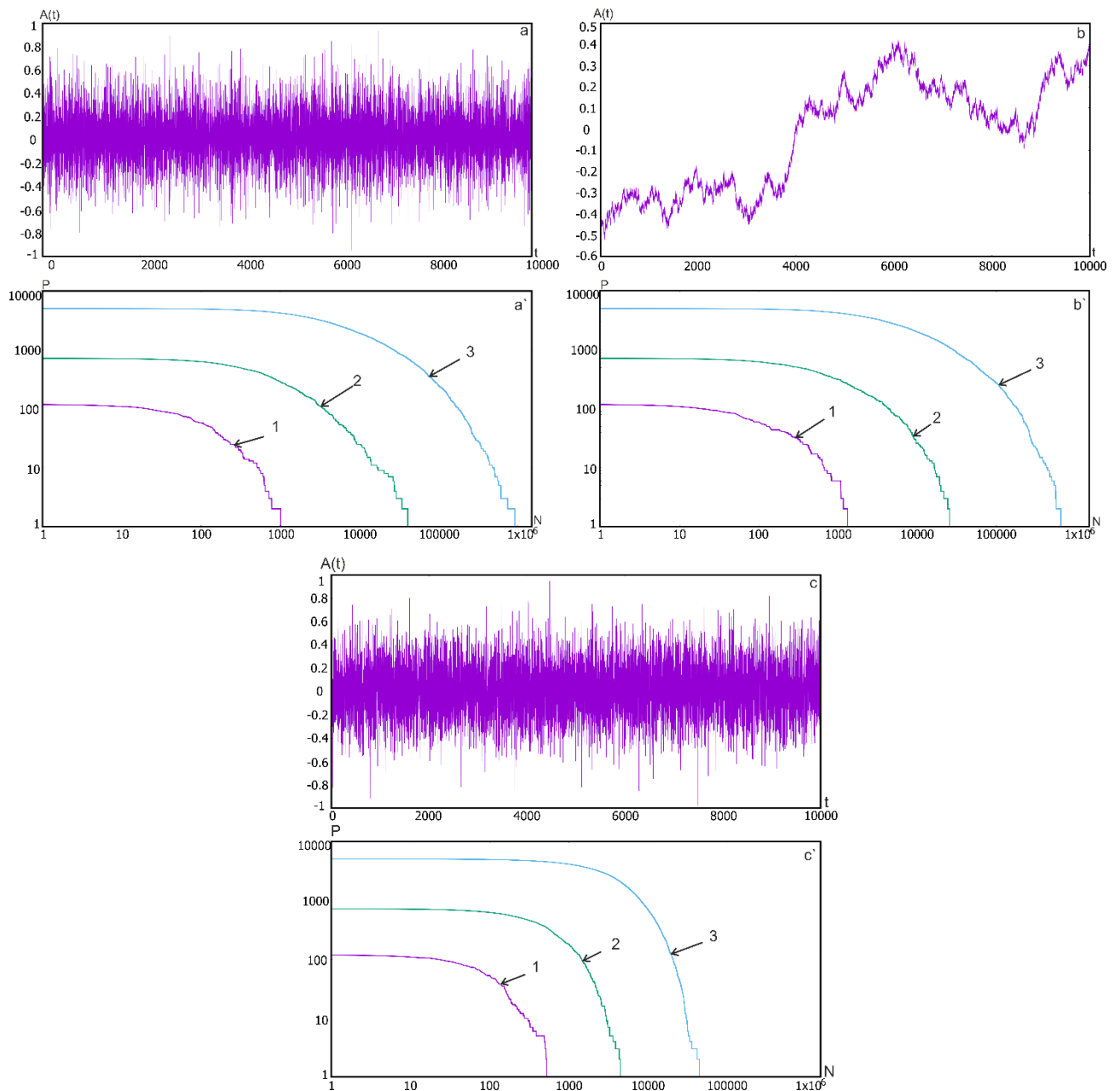


Рисунок 5. Шумовая динамика: а,b,c – исследуемые временные ряды фиолетового, броуновского и белого шума соответственно; а`,b`,`c` - графики зависимости количества запрещенных паттернов перестановок P от длины соответствующего временного ряда где цифрами обозначены различные порядки паттернов n: 1 - n=5; 2 - n=6; 3 - n=7.

Для нахождения всех паттернов временного ряда белого шума потребовалось меньше всего точек, а для броуновского и фиолетового потребовалось примерно одинаковое количество точек, при этом в  $\sim 10$  раз большее, чем для белого шума.



## Добавление шумовой динамики во временной ряд с непрерывным временем

Во временной ряд с непрерывным временем была аддитивно добавлена компонента белого шума в 3 области: с 10000 до 20000, с 40000 до 50000 и с 70000 до 80000. Сначала добавили шум в 2 раза больше амплитуды временного ряда. Затем добавлялся шум с амплитудой в 10 раз меньше амплитуды временного ряда. Затем снова амплитуда шума уменьшалась в 10 раз и так до тех пор, пока программа не переставала отличать шум. Эти действия были повторены с броуновским и фиолетовым шумом.

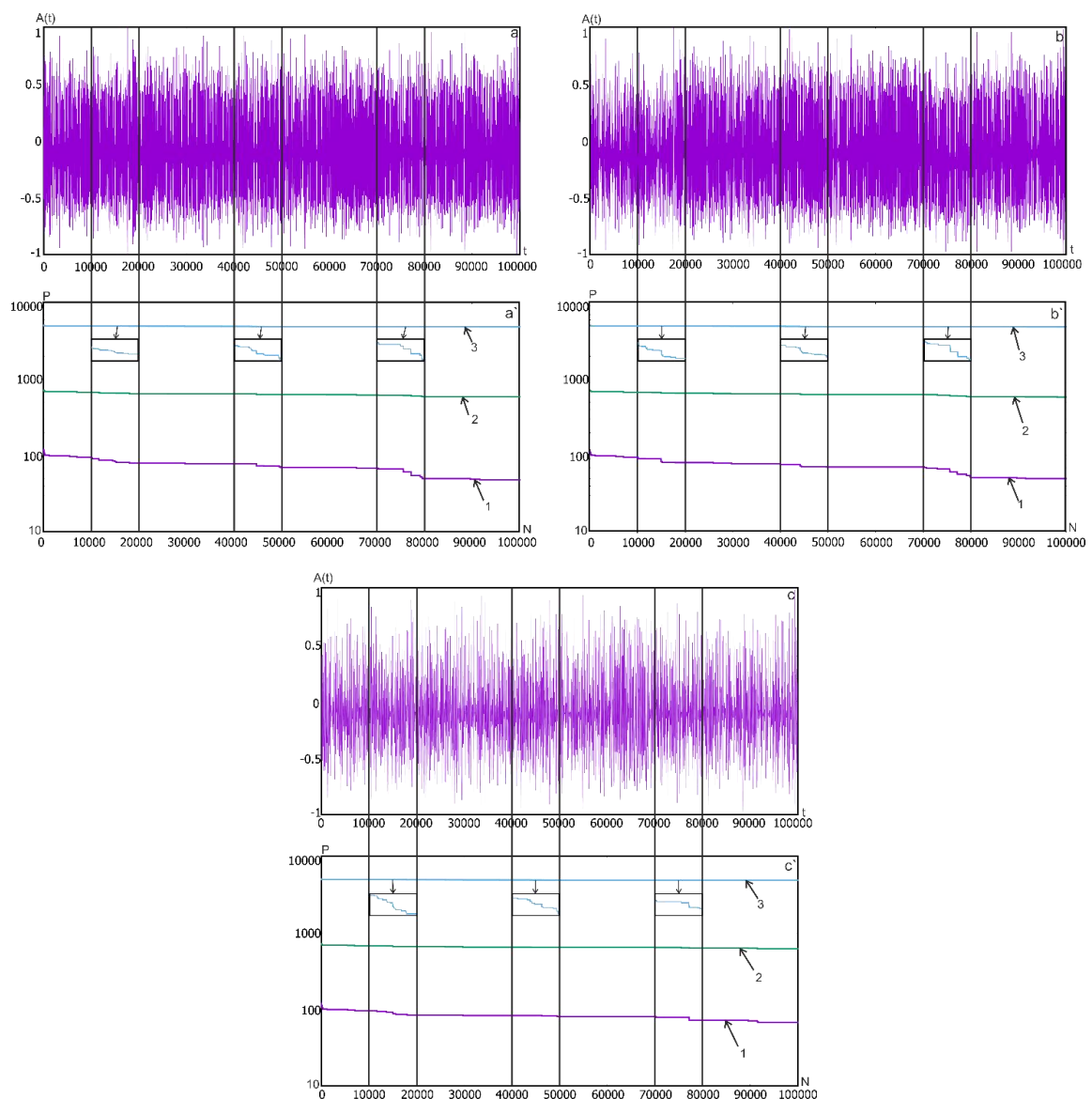


Рисунок 6. Хаотическая динамика(система Лоренца): a,b,c – исследуемые временные ряды с добавлением фиолетового, броуновского и белого шума соответственно. С амплитудой шума в 1000, 10 и 1000 раз меньшей амплитуды временного ряда соответственно; a`b`,c` - графики зависимости количества запрещенных паттернов перестановок P от длины

соответствующего временного ряда где цифрами обозначены различные порядки паттернов  $n$ : 1 -  $n=5$ ; 2 -  $n=6$ ; 3 -  $n=7$ .

В итоге было выявлено, что метод способен выявлять белый и фиолетовый шум малых (в 1000 раз меньше амплитуды временного ряда) амплитуд, а броуновский шум распознавался вплоть до амплитуды в 10 раз меньшей амплитуды временного ряда. Из чего можно сделать вывод, что броуновский шум сложнее всего распознавать.

### **Выводы относительно оптимальных параметров**

Были протестированы разные порядки паттернов с использованием длины временного ряда равной  $10^5$  точкам, а также на имеющемся компьютере. Использовался процессор Intel® Core™ i7-11800H и 16 Гб оперативной памяти. Было замерено время, требующееся для анализа временного ряда с использованием определенных порядков паттернов. Результаты в таблице 1.

Таблица 1. Зависимость затраченного времени на анализ временного ряда от порядка паттерна.

| Порядок паттерна $n$ | Время, затраченное на анализ, сек |
|----------------------|-----------------------------------|
| 4                    | 0.924                             |
| 5                    | 2.137                             |
| 6                    | 9.276                             |
| 7                    | 61.783                            |
| 8                    | 488.912                           |

## Заключение.

Протестировав метод на системах с динамикой разной природы и с аддитивным добавлением шума разной амплитуды, была верифицирована работоспособность метода.

Было выявлено, что при увеличении порядка паттерна перестановки чувствительность метода к меньшей амплитуде шума возрастала: при порядке паттерна 6 определялся шум, амплитуда которого была в 10 раз меньше амплитуды временного ряда, а при порядке паттерна 7 распознаваемый шум мог быть уже в 100 раз меньше амплитуды временного ряда

Установлено, что оптимальным по временным затратам порядком паттерна был выявлен порядок  $n=7$

Во временном ряде удастся обнаружить белый и фиолетовый шум с амплитудой в 1000 раз меньше амплитуды временного ряда.

Во временном ряде удастся обнаружить броуновский шум с амплитудой в 10 раз меньше амплитуды временного ряда.

Результаты, полученные в ходе данной дипломной работы, были успешно представлены на следующих научных конференциях и мероприятиях:

1. XV Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», которая проходила в Саратовском филиале ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН.

2. XXV Annual Conference Saratov Fall Meeting 2021 and IX Symposium on Optics and Biophotonics, section "Computational Biophysics and Nanobiophotonics".

3. Конкурс УМНИК 2021 в Саратовской области по направлению Н1: Информационные технологии, проект "Разработка метода обнаружения несанкционированного проникновения беспилотных летательных аппаратов

(БПЛА) на основе исследования аудиодорожек на наличие в ней артефактов, присутствие которых говорит о наличии БПЛА в наблюдаемой области пространства."

4. XVII Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», которая проходила в Саратовском филиале ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН

5. Студенческая научная конференция института физики, 2022 г.

6. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ «Программа для качественного и количественного исследования динамики временного ряда на основе количественного и количественного исследования динамики временного ряда на основе количественного анализа запрещенных паттернов перестановки». Номер регистрации/свидетельства: 2022667745. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ: 25 сентября 2022 года.

### Список литературы

1. Faust, O. & Bairy, M. G. Nonlinear analysis of physiological signals: A review. *J Mech Med Biol* **12**, (2012).
2. Richards, W. G. Spectral analysis. *Nature* **225**, 569 (1970).
3. Nagarajan, P., Di Troia, F., Austin, T. H. & Stamp, M. Autocorrelation analysis of financial botnet traffic. *ICISSP 2018 - Proceedings of the 4th International Conference on Information Systems Security and Privacy 2018-Janua*, 599–606 (2018).
4. Bandt, C. & Pompe, B. Permutation Entropy: A Natural Complexity Measure for Time Series. *Phys Rev Lett* **88**, 4 (2002).
5. Zunino, L., Zanin, M., Tabak, B. M., Pérez, D. G. & Rosso, O. A. Forbidden patterns, permutation entropy and stock market inefficiency. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* **388**, 2854–2864 (2009).

6. Zanin, M., Zunino, L., Rosso, O. A. & Papo, D. Permutation entropy and its main biomedical and econophysics applications: A review. *Entropy* **14**, 1553–1577 (2012).
7. Barry, P. Head First Python. *Igarss 2014* 1–5 (2014).
8. Zunino, L., Zanin, M., Tabak, B. M., Pérez, D. G. & Rosso, O. A. Forbidden patterns, permutation entropy and stock market inefficiency. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* **388**, 2854–2864 (2009).