

Посвящается памяти **Jean-Louis Le Mouél** (1938-2025), французского геофизика, академика, стоявшего у истоков этих работ, начатых нами в 2012 году в Париже.

О способах использования прогноза событий при решении обратных задач

Блантер Е.М., Елаева М.С, Шнирман М.Г.

Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН

Идея работы

- **Сплошные среды эволюционируют во времени**
- **Неоднородности : Трещиноватость для твёрдых сред , вихри для жидких сред**
- **Идея – воспользоваться крупными перестройками в неоднородных средах для получения информации об их характерных неоднородностях**
- **Трансформировать эффективность прогноза в описание неоднородностей среды в рамках решения обратных задач.**

Две обратные задачи в неоднородной среде

•

➡ 1

➡ Мы предлагаем описать циркуляционные ячейки моделью синхронизации и использовать слабые события (фазовые экскурсии) для ограничения многомерной области восстанавливаемых параметров приполярной циркуляции.

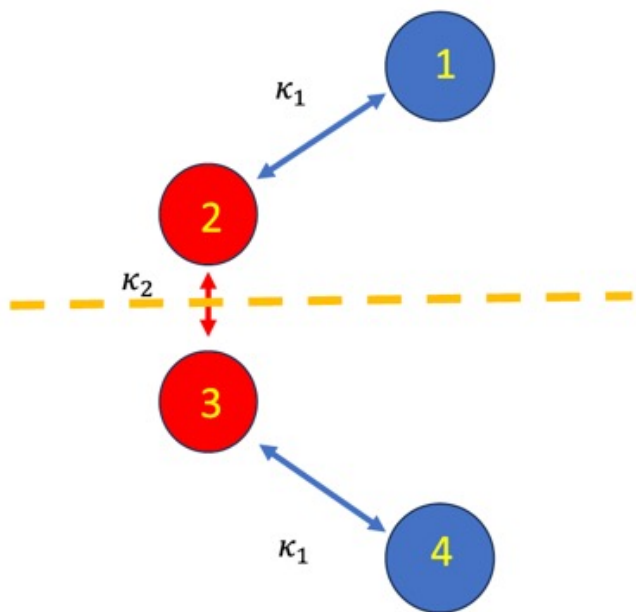
2. Мы предлагаем использовать вариацию прогнозируемости сильных событий для фиксированного алгоритма, как индикатор свойств неоднородной среды.

Модель синхронизации Курамото

Kuramoto, 1975, Actbron et al, 2005, Dorfler&Bullo 2013,2014, Rodriges et al, 2016

В приложениях
система неавтономна
 $\omega_i = \omega_i(t)$ и
предполагает новое
определение
синхронизации.

Пример симметричной
цепочки курамотовских
осцилляторов с
естественными частотами
 ω_P и ω_E
использованная для
моделирования Солнца



$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i + \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N K_{ij} \sin(\theta_j - \theta_i), \quad i = 1 \dots N$$

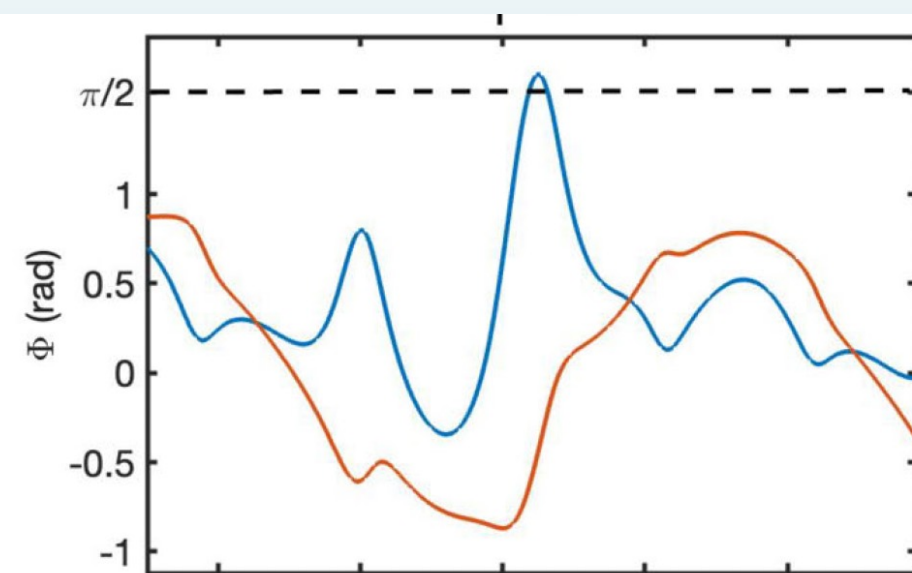
Частотная синхронизация –
сходимость к общей частоте
 Ω (солнечный цикл)

Фазовая синхронизация –
разница фаз остается в
районе устойчивой
синхронизации без переходов
через $\pi/2 + \pi n$.

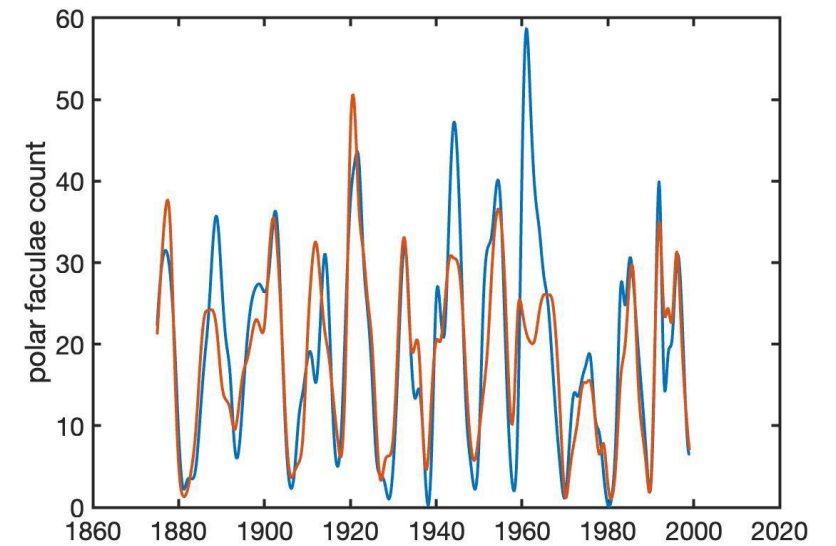
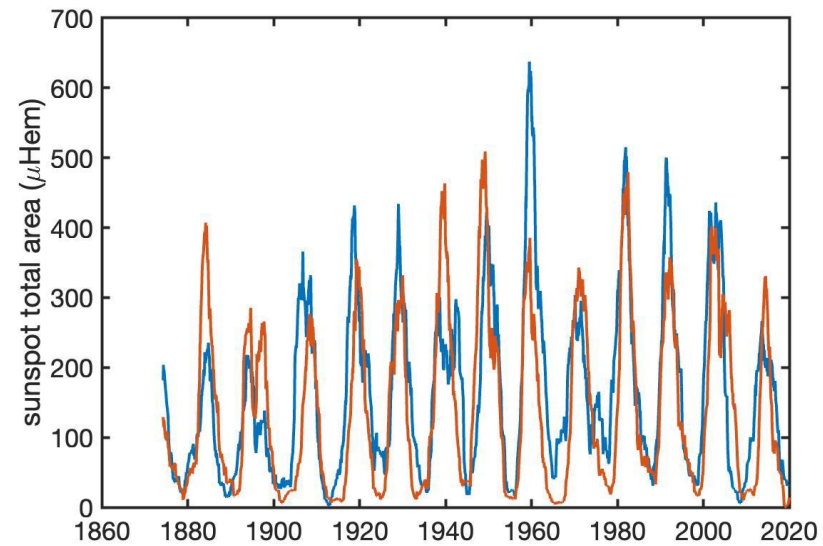
Экскурсия – переход через
 $\pi/2 + \pi n$ и возвращение в ту же
зону.

Катастрофа – переход через
 $\pi/2 + \pi n$ и возвращение в ту же
зону с разницей фаз 2π

Пример экскурсии, связанной с
медленной периодической
вариацией естественных частот в
синхронизированной системе

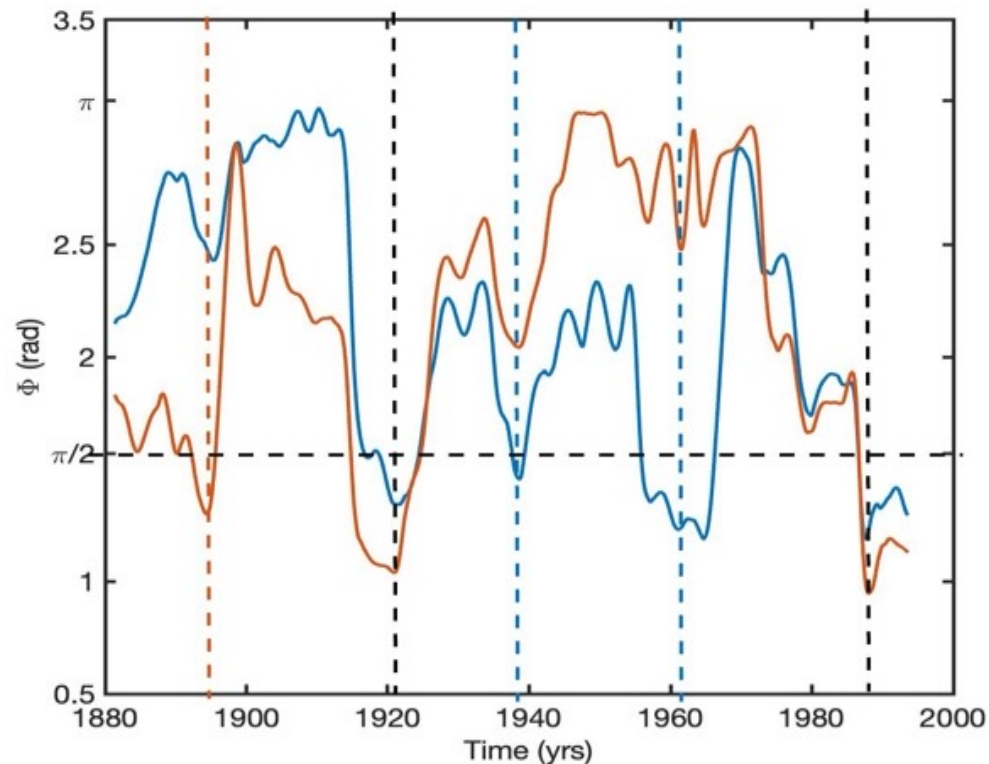


Синхронизация солнечных индексов

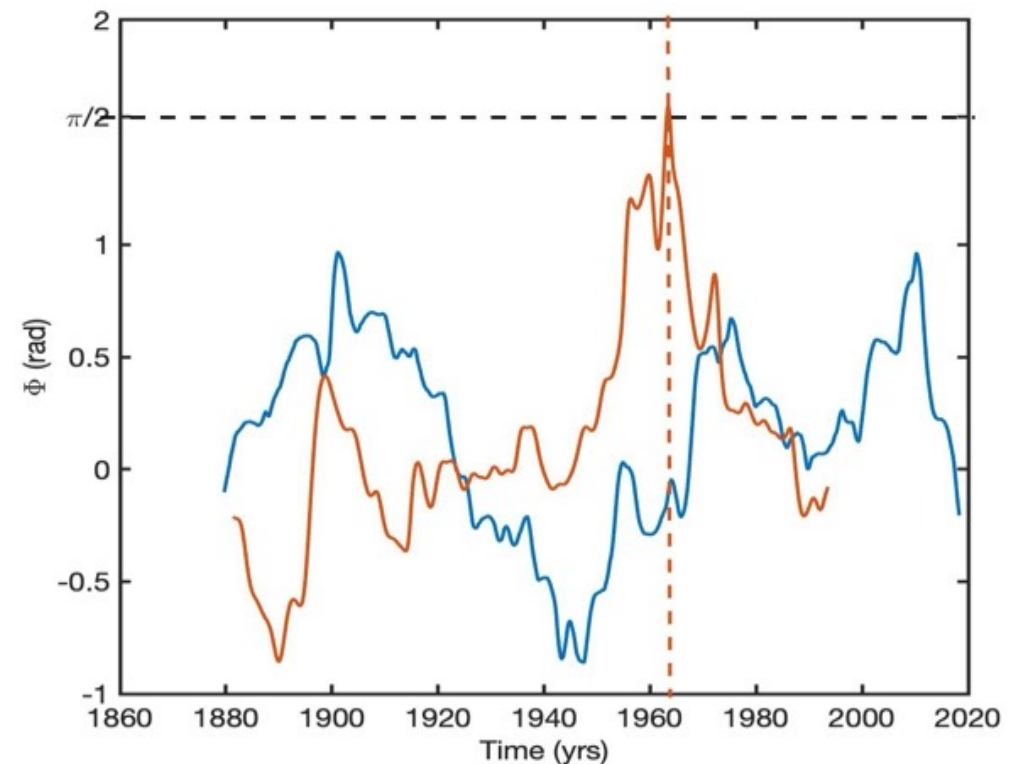


Нарушения фазовой синхронизации СОЛНЕЧНЫХ ИНДЕКСОВ

Между экватором и полюсом в
северной и **южной** полусфере



Между северной и южной полусферами
для **экватора** и **полюсов**



Гипотеза синхронизации и ее нарушений: нарушения синхронизации связаны с медленной вариацией естественных частот (скоростей меридионального потока)

Обратная задача: оценить амплитуды вариаций по наблюдаемым нарушениям синхронизации и средним величинам фазовых разниц

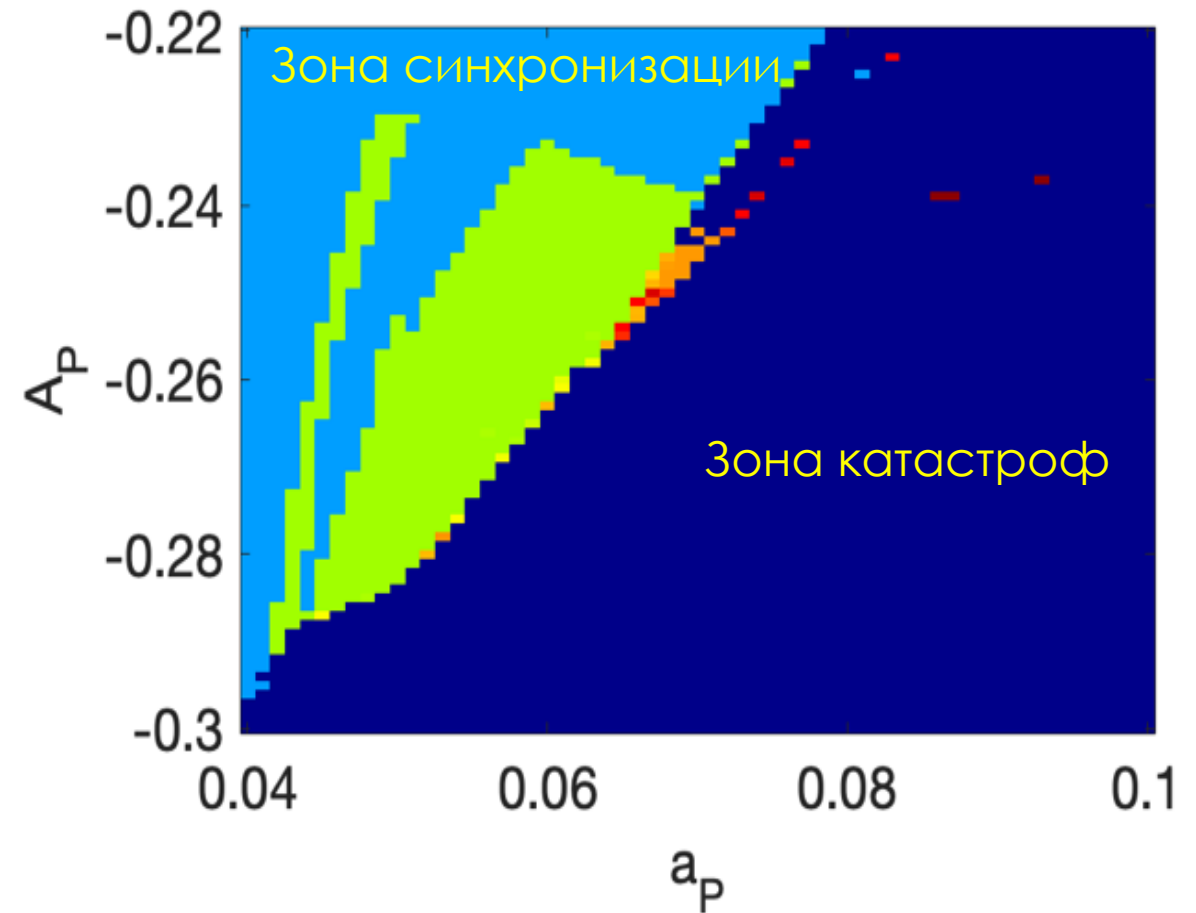
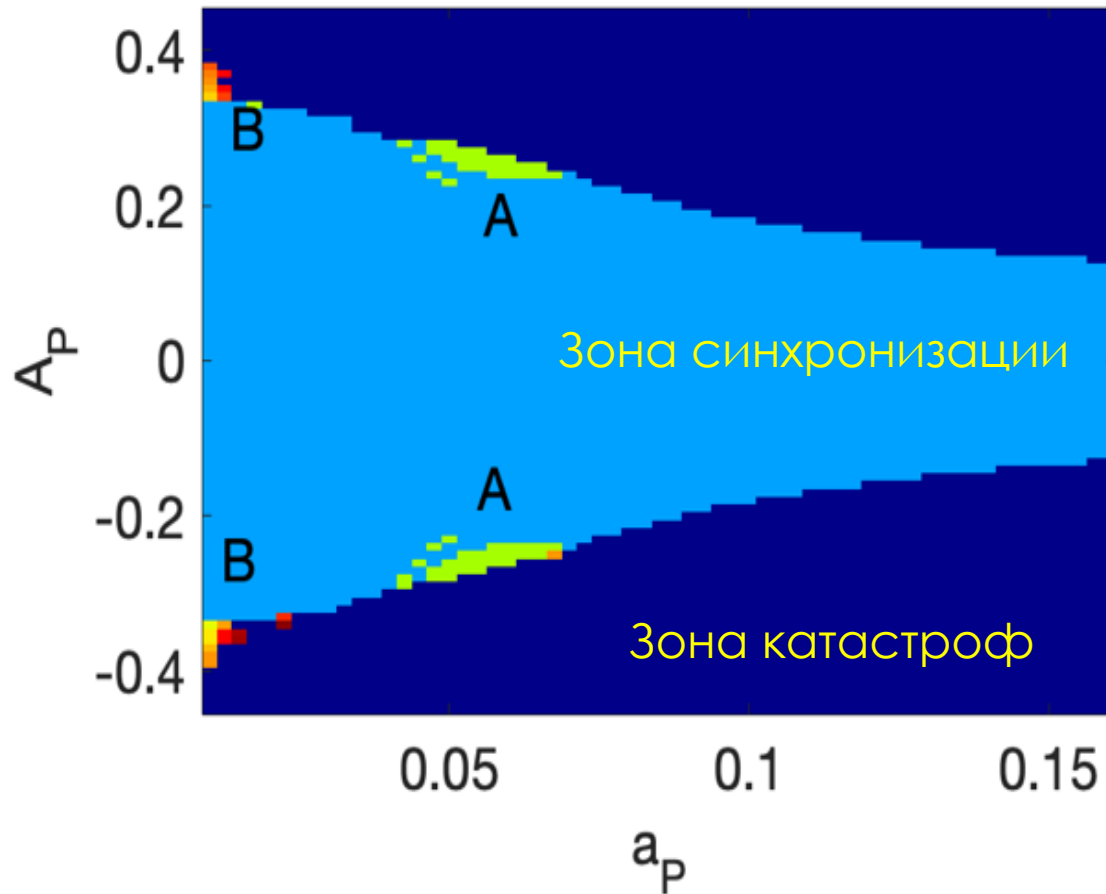


Синхронизация солнечных индексов

- Гипотеза 1. Нарушения синхронизации между полярными и экваториальными индексами определяются долговременными вариациями естественных частот
- Гипотеза 2. 22-летние вариации на полюсе симметричны относительно экватора
- Гипотеза 3. Цикл Гляйсберга анти-симметричен относительно экватора
- Задача. Оценить амплитуды долговременных вариации (22-летнего цикла и цикла Гляйсберга) в скоростях (естественных частотах) меридионального потока

Результаты прямого моделирования

Зона солнечных экскурсий включает отдельные экскурсии в каждой полусфере, синхронные экскурсии сразу в двух полусферах и экскурсию между полюсами.



$$A_p = 0.26 \pm 0.02, a_E = 0.25 \pm 0.01, a_p = 0.06 \pm 0.01$$

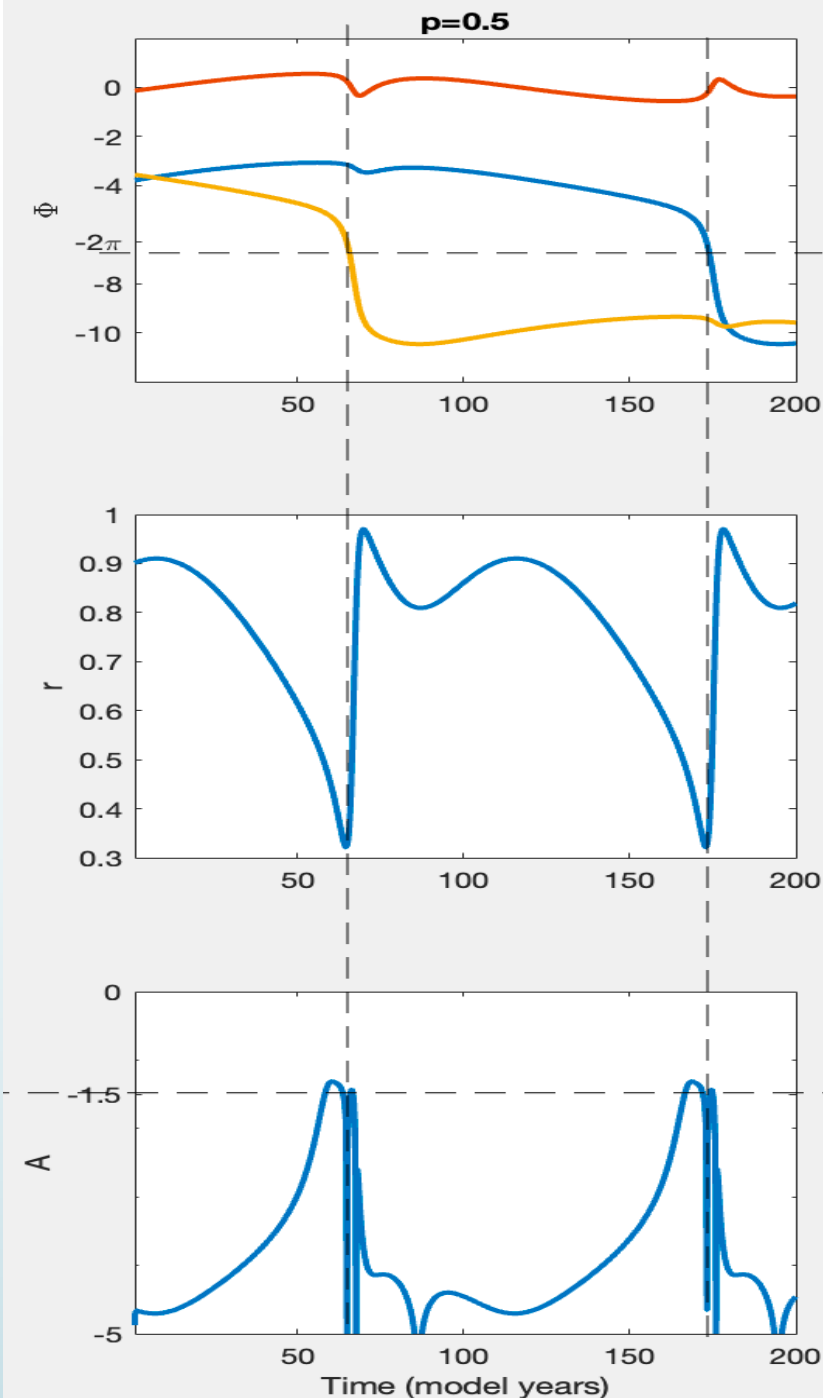


Вывод

Даже слабые нарушения синхронизации служат важным источником информации при изучении неоднородных сред и могут существенно уточнять решение обратной задачи.

Экстремальные события и их прогноз

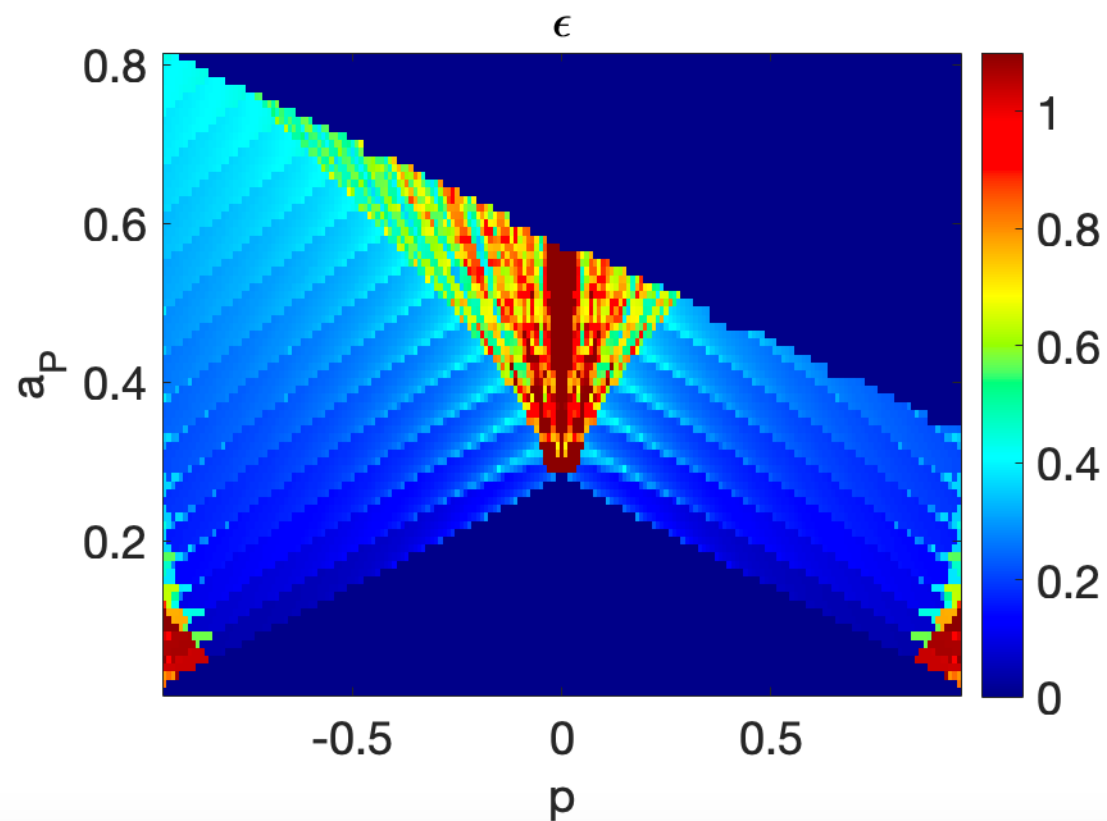
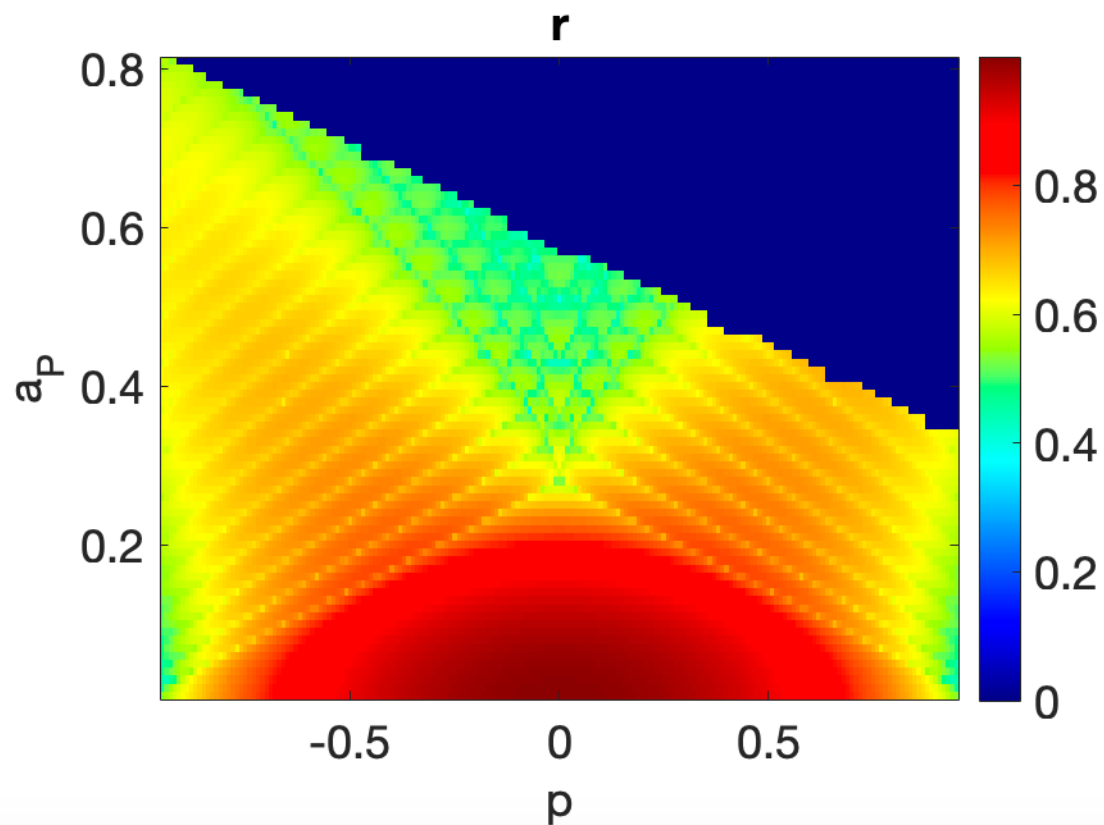
- В симметричной модели Курамото из 4-х осцилляторов рассматривается антисимметричная долгопериодная вариация естественных частот крайних осцилляторов с амплитудой a_p .
- В системе возникают редкие катастрофы, связанные с отрывом одного из крайних осцилляторов от остальных.
- В качестве предвестника используется асимметрия параметра порядка дополнительной системы (Elaeva et al, 2023)
- Считается суммарная ошибка прогноза в зависимости от a_p и характеристики связи p .



Вариативность прогноза как характеристика системы

Средний по времени параметр порядка, при синхронизации близок к 1. Для его определения требуется знать все коэффициенты связи

Ошибка прогноза экстремальных событий. Для ее определения достаточно каталога событий и фиксированного алгоритма прогноза



Вывод

Сила связей в среде проявляется в прогнозируемости сильных событий

- Изменение эффективности прогноза при фиксированном алгоритме отражает изменение силы связей в среде
- Чем регулярнее (синхроннее) система, тем лучше она прогнозируется.
- Ослабление связи (при сохранении степени синхронизации !) способствуют успешному прогнозу
- **Per praedictum eventus ad proprietates medii**



■ СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !