

# **Новые методы идентификации и анализа состояния природных объектов по данным мониторинга**

***Новосёлов Олег Николаевич***

**д.т.н., проф.**

**E-mail : [onn@mgul.ac.ru](mailto:onn@mgul.ac.ru)**

**Москва, 2008**

## Идентификация:

здесь – это построение графического и математического образов состояния объекта по последовательности значений измеренного параметра.

Предлагаются методы, позволяющие идентифицировать состояние природного объекта и оценить его устойчивость *в ходе мониторинга*. Можно, разумеется, и по накопленным данным.

## Преимущества методов:

- доступность для любого пользователя;
- универсальность для всех предметных областей;
- наглядность и сопоставимость результатов.

## Идентификация:

- Диаграмма Пуанкаре
- Феноменологическое уравнение

## Анализ:

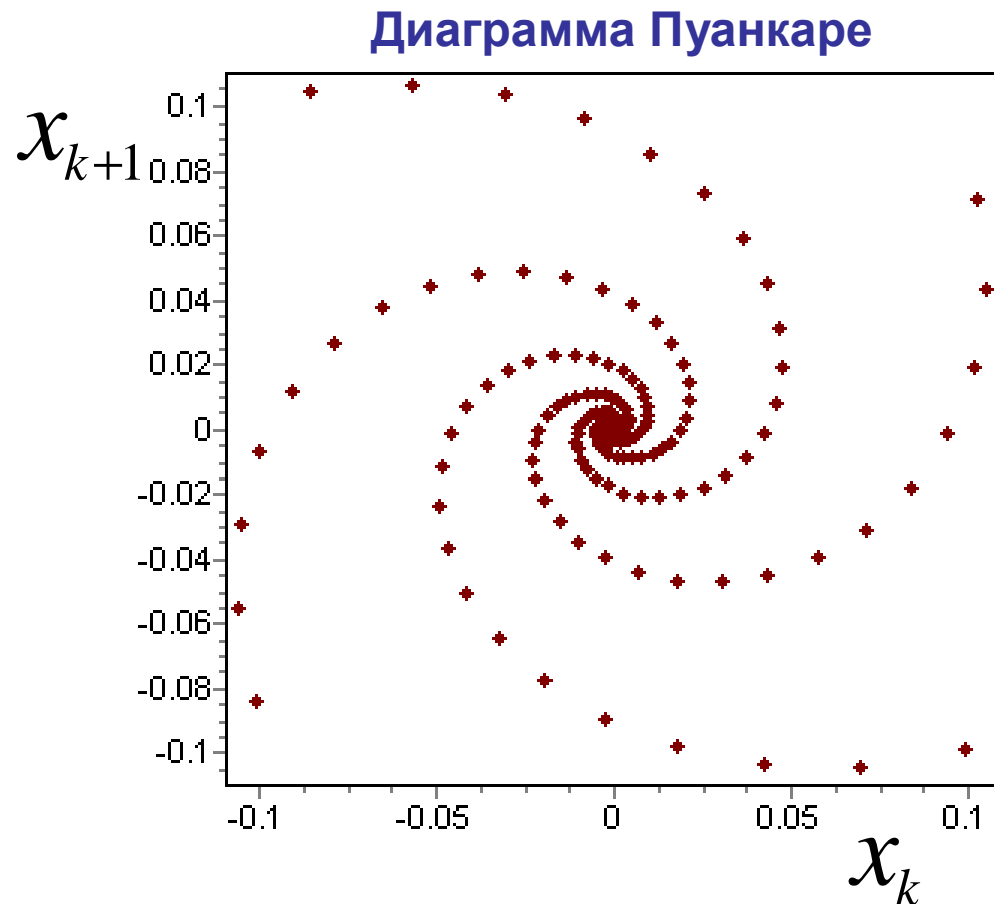
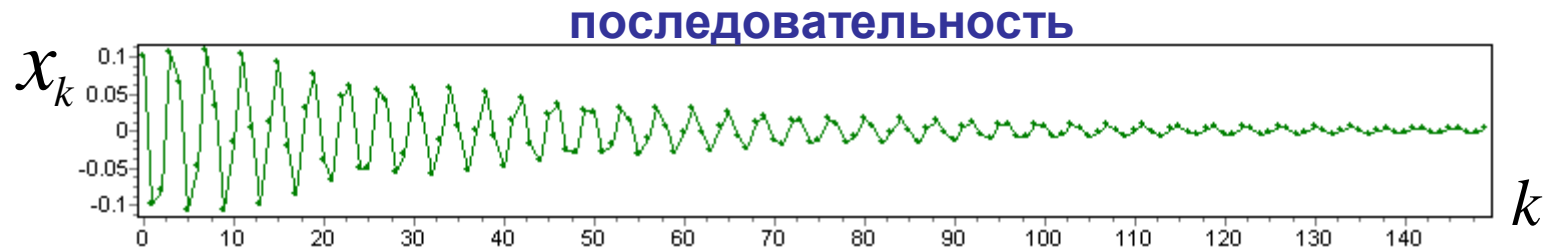
- Пространство решений феноменологического уравнения
- Установление состояния объекта

# Диаграмма Пуанкаре – графический образ состояния объекта

Пусть  $x_k, k = 1, 2, 3, \dots, N$  - последовательные значения измеряемого параметра объекта.

Диаграмма Пуанкаре представляет собой точечное графическое отображение  $N$  значений последовательности  $x_k$  при  $k = 1, 2, 3, \dots, N$  на двумерном поле, в котором ординатой очередной точки является значение  $x_{k+1}$ , а абсциссой – предшествующее значение  $x_k$ . Нанося поочередно точки для  $k = 1, 2, 3, \dots, N$  на график, получаем точечное множество  $x_{k+1}(x_k)$ , образующее фигуру, по которой можно судить о состоянии контролируемого объекта.

# Устойчивое состояние объекта – сходящаяся последовательность измерений



$$x_{k+2} = ax_{k+1} + bx_k$$

$$x_0 = 0,1$$

$$x_1 = -0,1$$

$$a = -0,1$$

$$b = -0,95$$

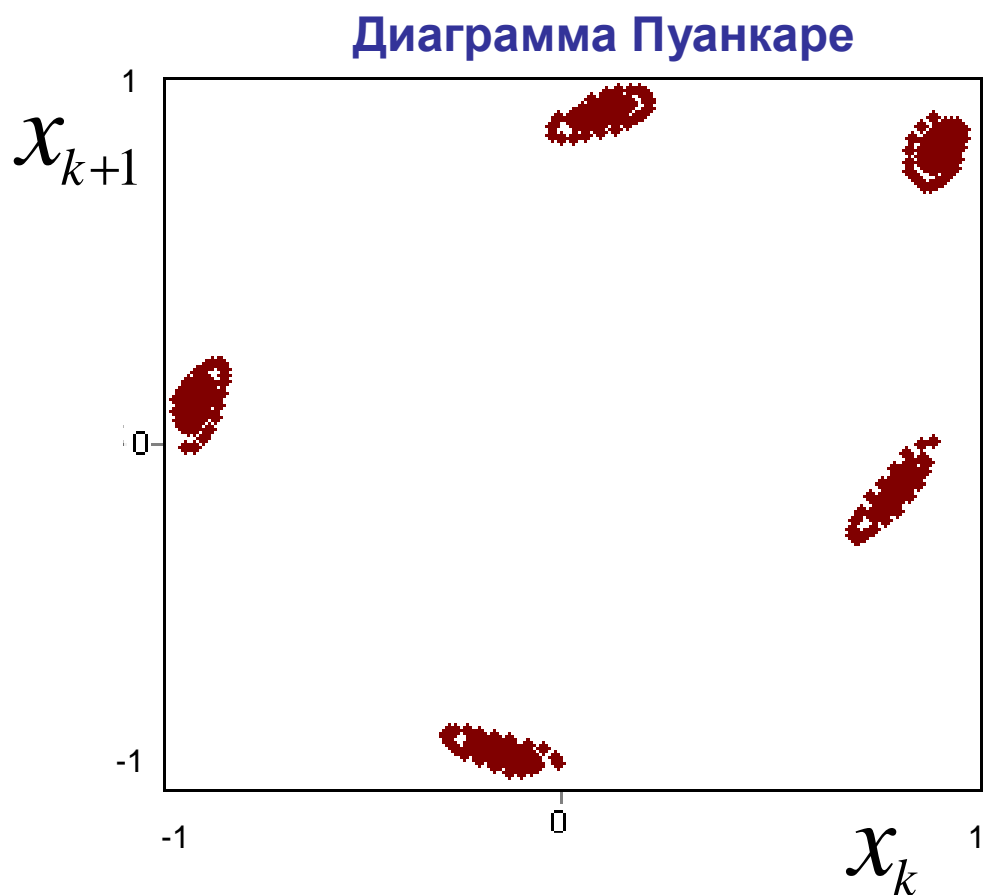
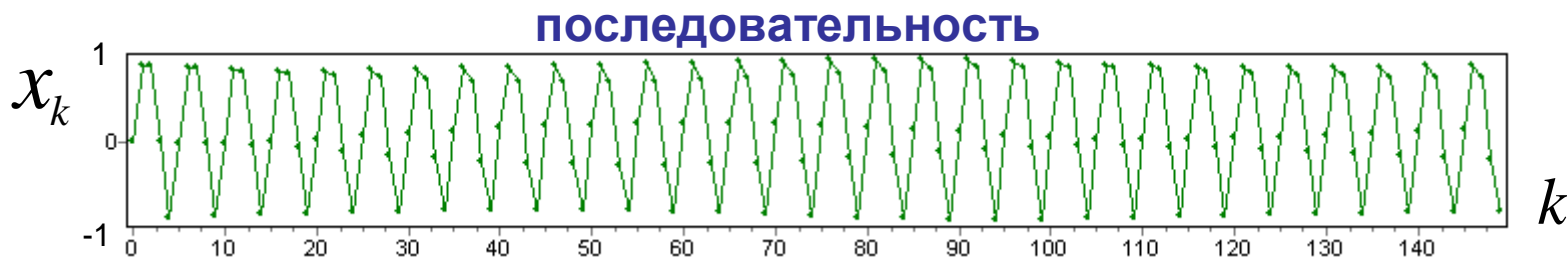
$$h = 0,05$$

$$\varepsilon = 0,0001$$

$$N = 700$$

$$k = 0 \div 150$$

# Неустойчивое состояние объекта – не затухающие колебания (асимптотический 5-цикл)



$$x_{k+2} = ax_{k+1} + bx_k + x_{k+1}^2$$

$$x_0 = 0,001$$

$$x_1 = 0,5$$

$$a = 0,5$$

$$b = -0,99$$

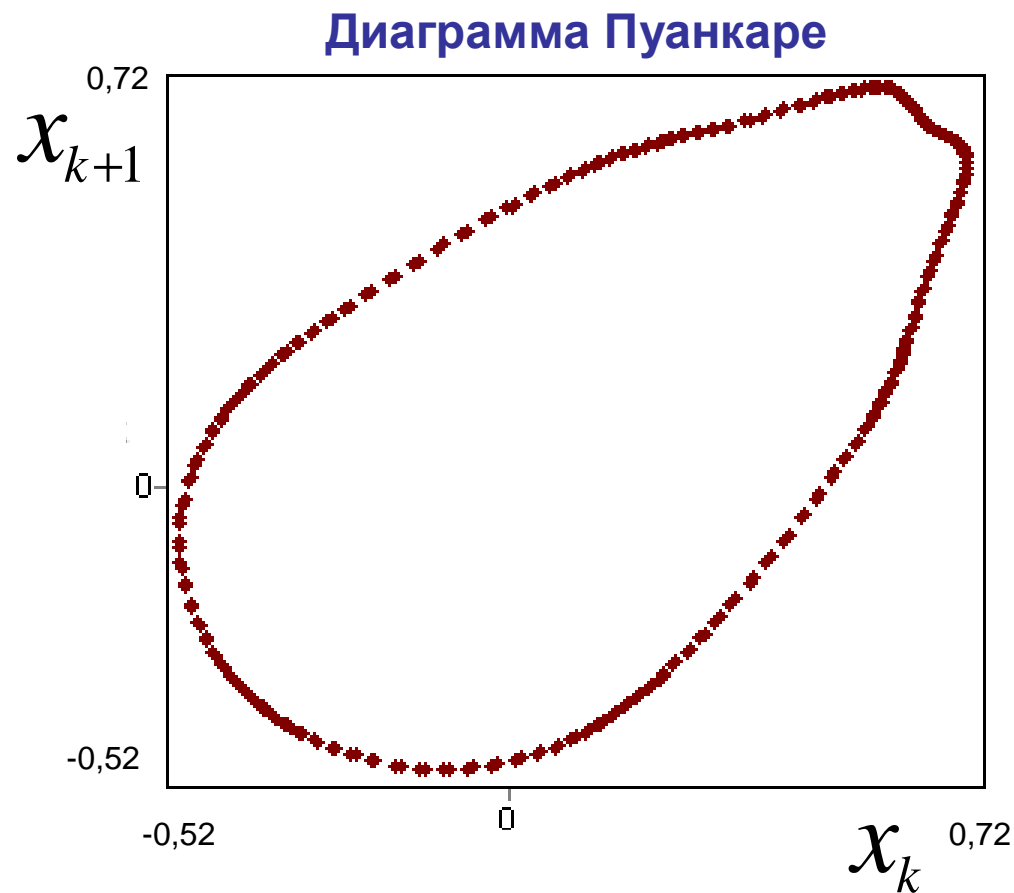
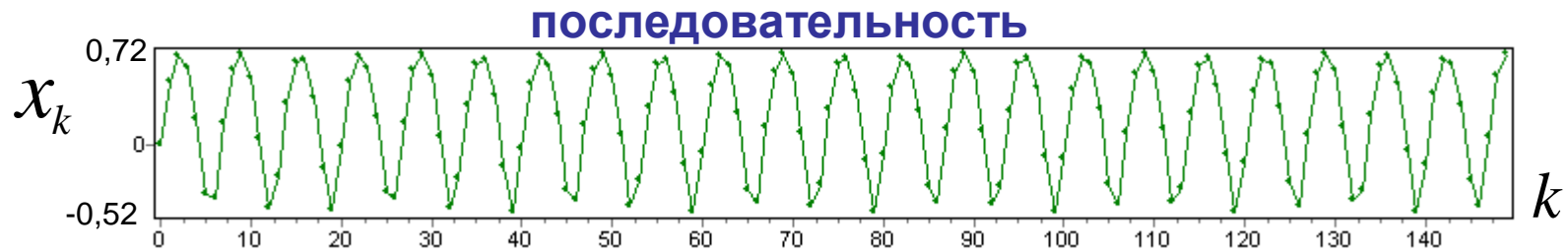
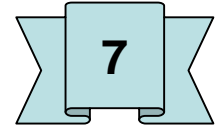
$$h = 0,05$$

$$\varepsilon = 10^{-5}$$

$$N = 500; \quad k = 0 \div 150;$$

$$\max |x_k| = 1$$

# Неустойчивое состояние объекта – почти периодическое колебание - 1



$$x_{k+2} = ax_{k+1} + bx_k + x_{k+1}^2$$

$$x_0 = -0,001$$

$$x_1 = 0,5$$

$$a = 0,9$$

$$b = -1$$

$$h = 0,01$$

$$\varepsilon = 10^{-4}$$

$$N = 300$$

$$k = 0 \div 150$$

# Неустойчивое состояние объекта – почти периодическое колебание - 2

последовательность

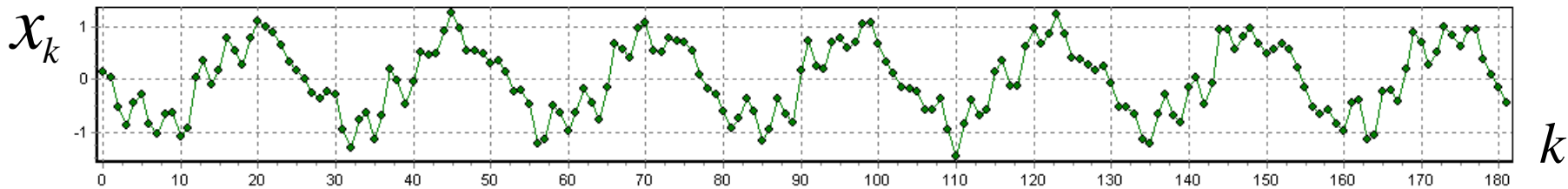
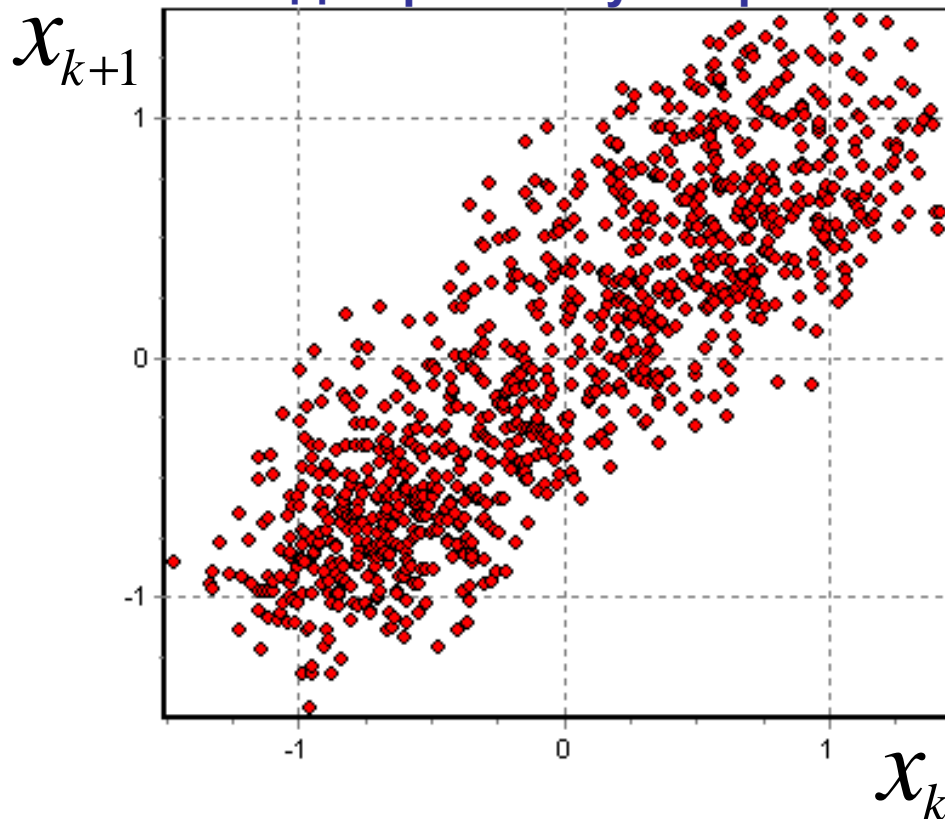


Диаграмма Пуанкаре



$$x_{k+10} = a_1 x_k + a_2 x_{k+1} + a_3 x_{k+2} + a_4 x_{k+3} + a_5 x_{k+4} + a_6 x_{k+5} + a_7 x_{k+6} + a_8 x_{k+7} + a_9 x_{k+8} + a_{10} x_{k+9}$$

$$x_0 = 1,1; \quad a_1 = -1; \quad h = 0,05$$

$$x_1 = 0,9; \quad a_2 = 2; \quad \mathcal{E} = 10^{-6}$$

$$x_2 = 0,8; \quad a_3 = -3,56; \quad N = 1000$$

$$x_3 = 0,7; \quad a_4 = 5,38; \quad k = 35 \div 215$$

$$x_4 = 0,6; \quad a_5 = -6,5;$$

$$x_5 = 0,5; \quad a_6 = 6,85;$$

$$x_6 = 0,4; \quad a_7 = -6,5;$$

$$x_7 = 0,3; \quad a_8 = 5,38;$$

$$x_8 = 0,2; \quad a_9 = -3,56;$$

$$x_9 = 0,1; \quad a_{10} = 2;$$



# Неустойчивое состояние объекта – хаотическое колебание

последовательность

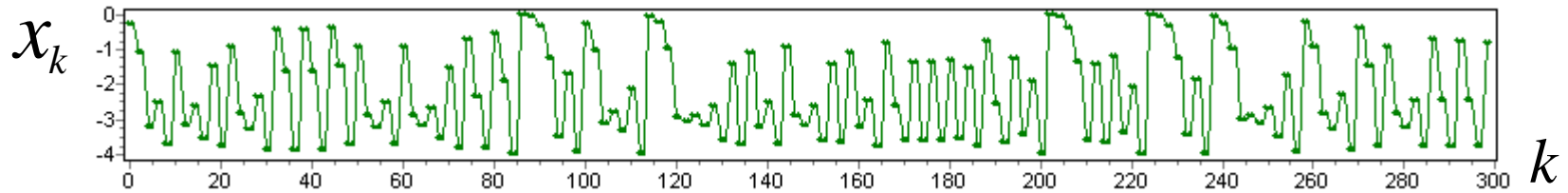
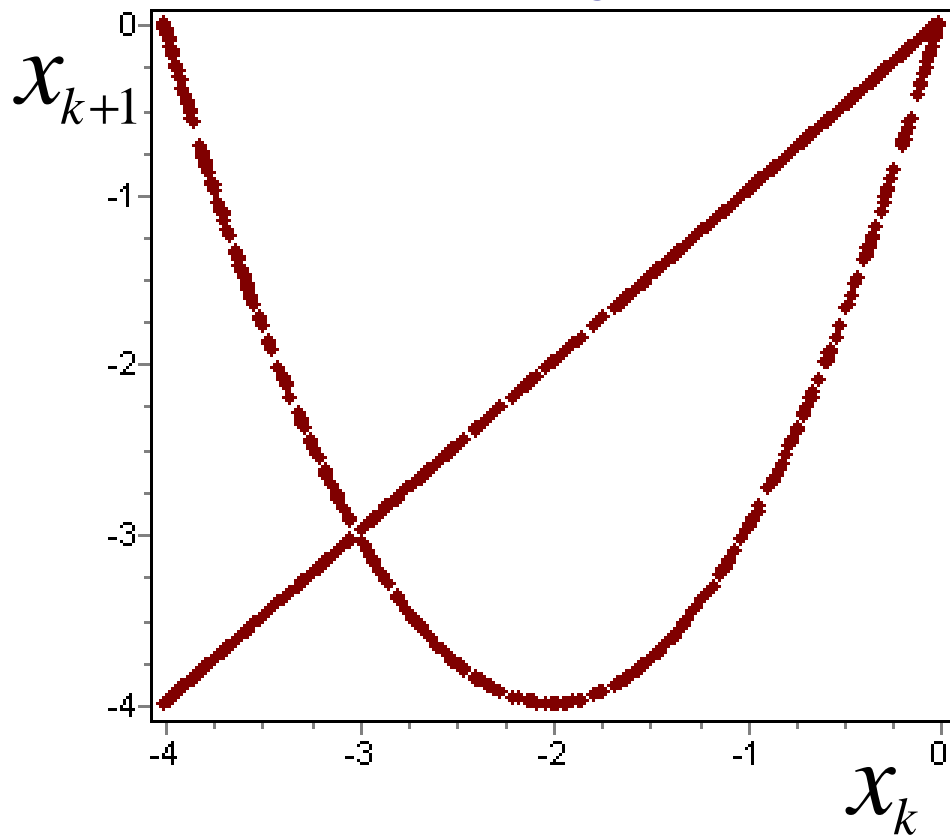


Диаграмма Пуанкаре



$$x_{k+2} = ax_{k+1} + bx_k + x_k^2$$

$$x_0 = -0,3$$

$$x_1 = -0,3$$

$$a = 0$$

$$b = 4$$

$$h = 0,05$$

$$\mathcal{E} = 10^{-5}$$

$$N = 800$$

$$k = 0 \div 300$$

# Катастрофическое состояние объекта – расходящаяся последовательность

10

последовательность

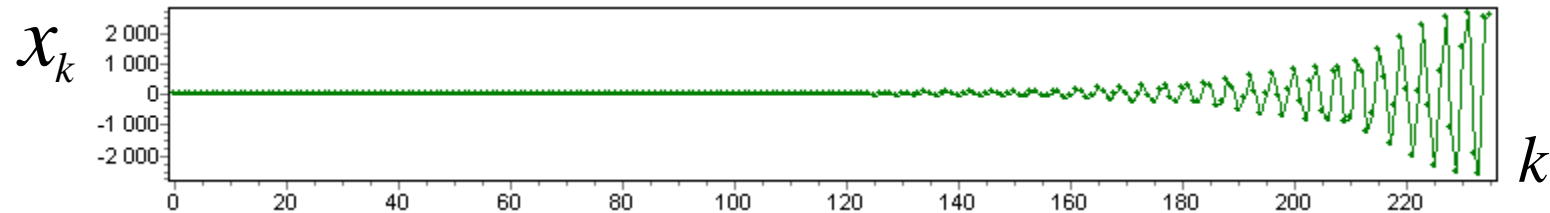
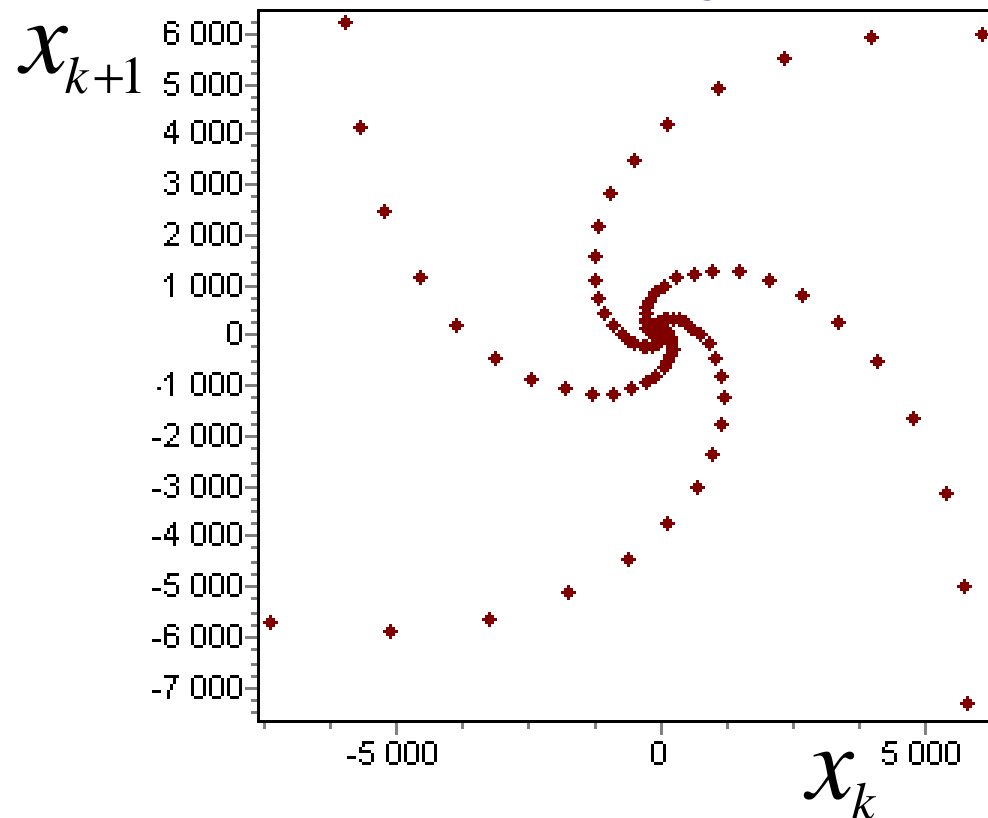


Диаграмма Пуанкаре



$$x_{k+2} = ax_{k+1} + bx_k$$

$$x_0 = 0,1$$

$$x_1 = -0,1$$

$$a = -0,1$$

$$b = -1,1$$

$$h = 0,05$$

$$\varepsilon = 10^{-4}$$

$$N = 236$$

$$k = 0 \div 236$$

# Отсутствие информации – 1 – случайный шум

11

Белый шум с равномерным распределением значений в интервале  $[-0,5; 0,5]$

последовательность

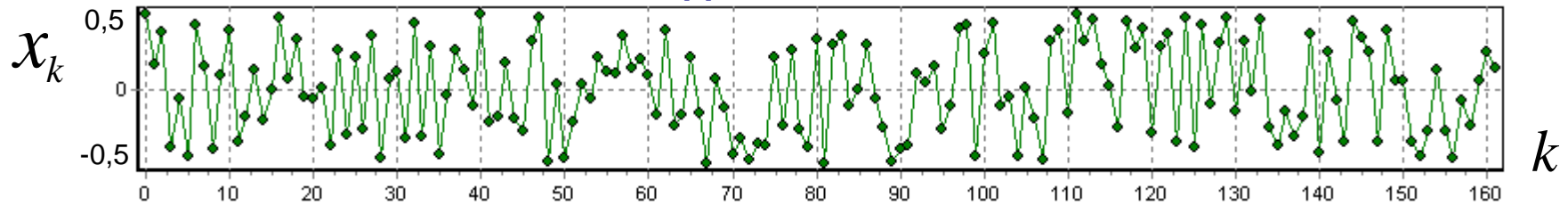
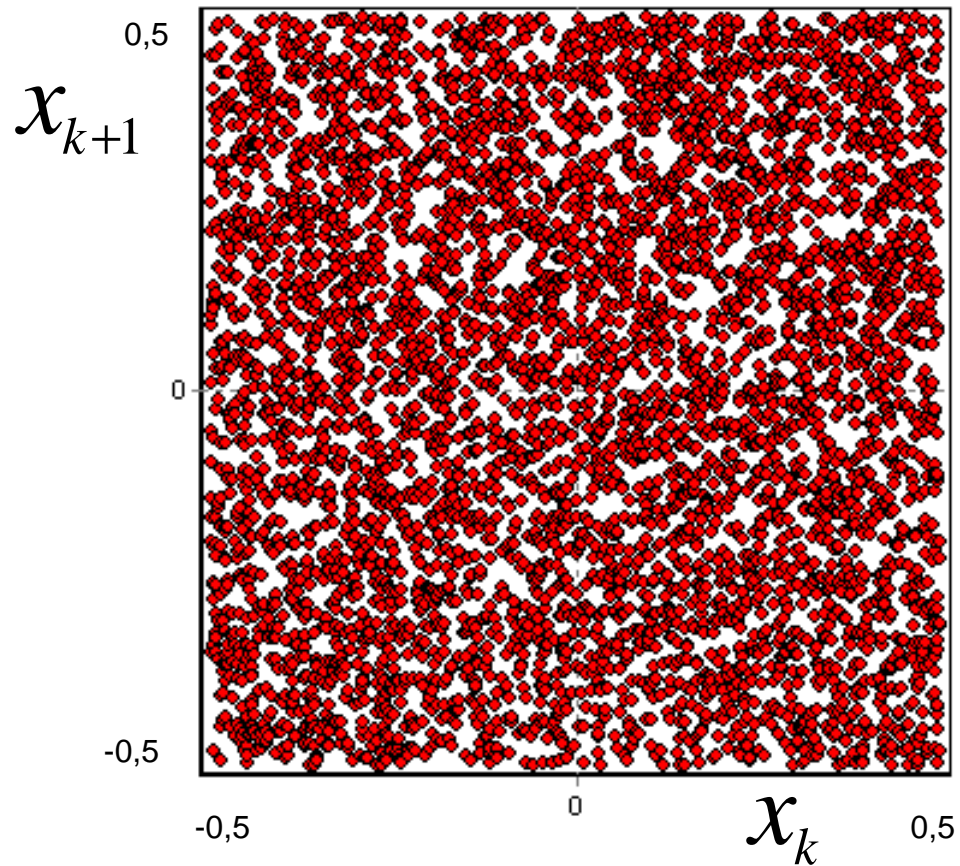


Диаграмма Пуанкаре



# Отсутствие информации – 2 –

Белый Гауссовский шум с  $m_x=0$ ,  $D_x=1$

12

последовательность

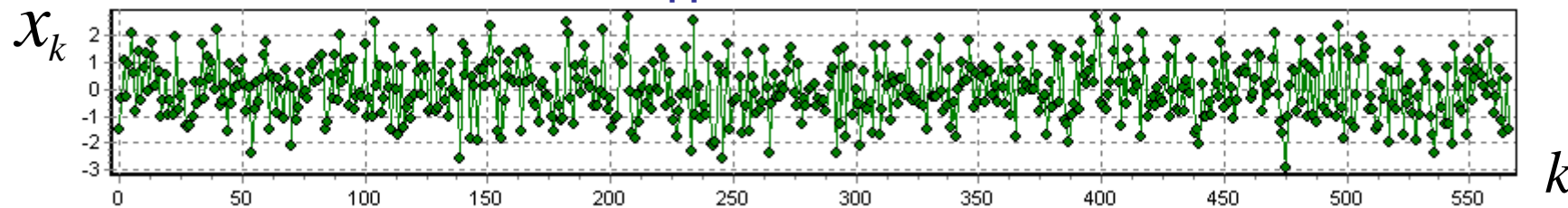
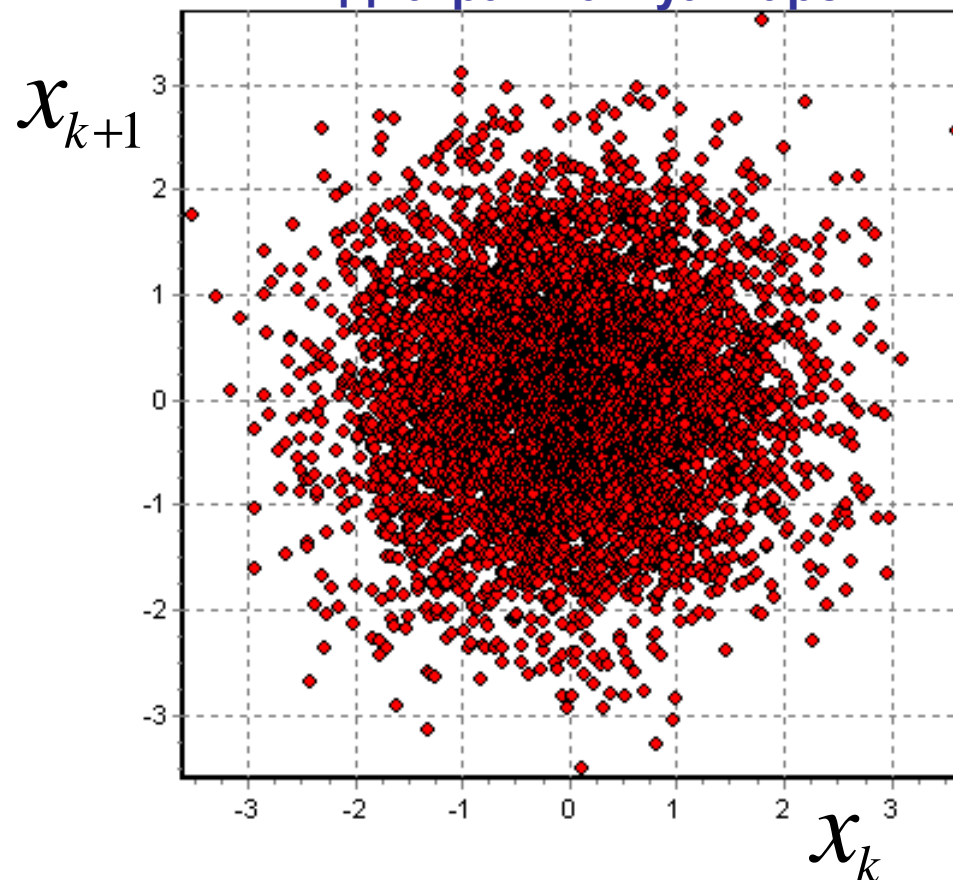
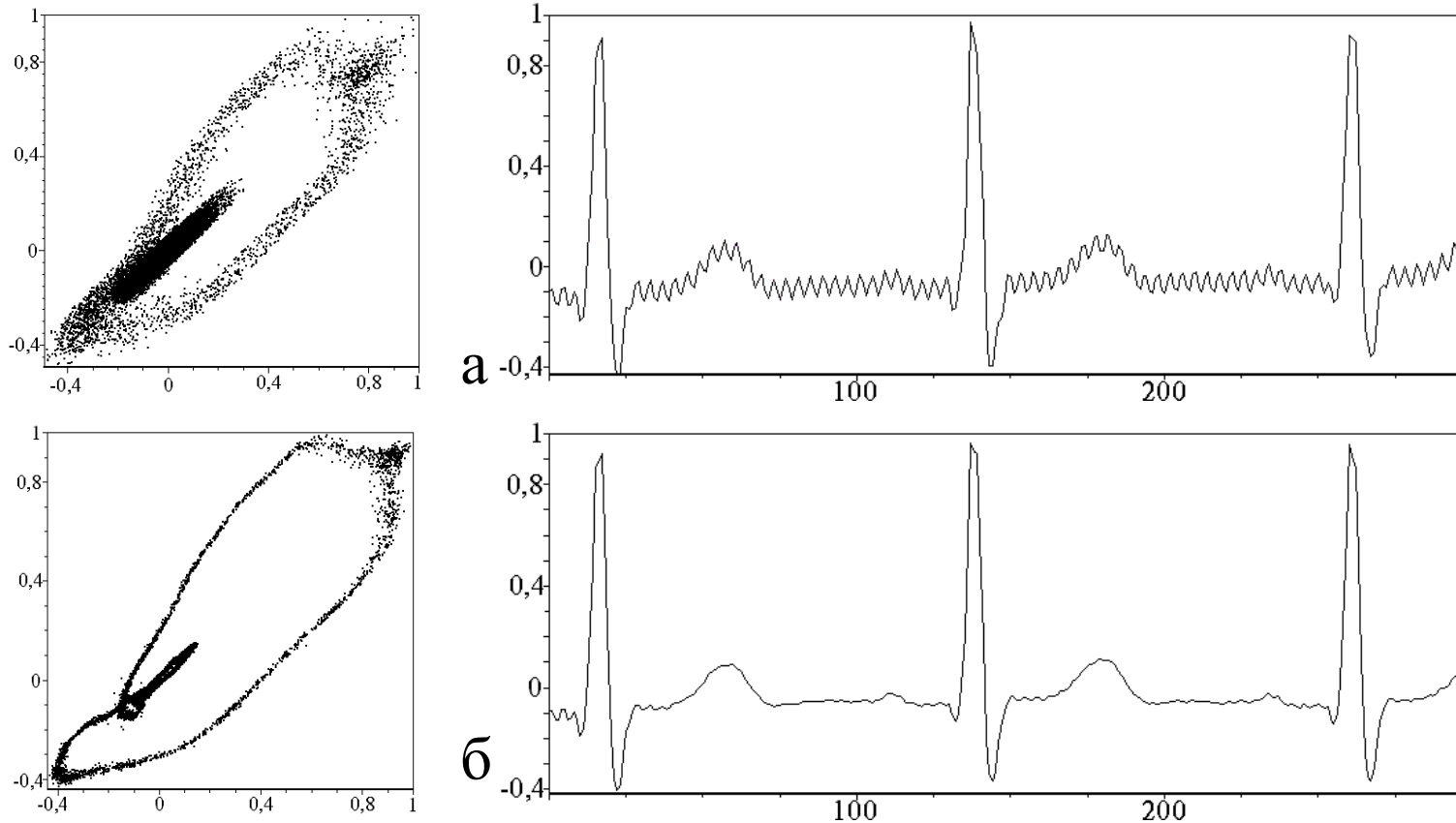


Диаграмма Пуанкаре

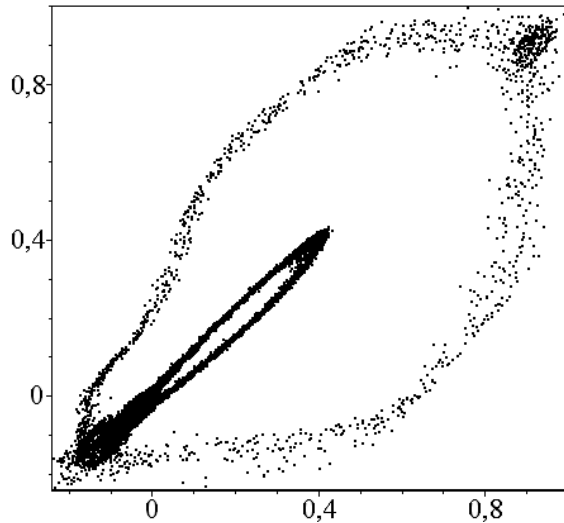


# Объект 1- сердце



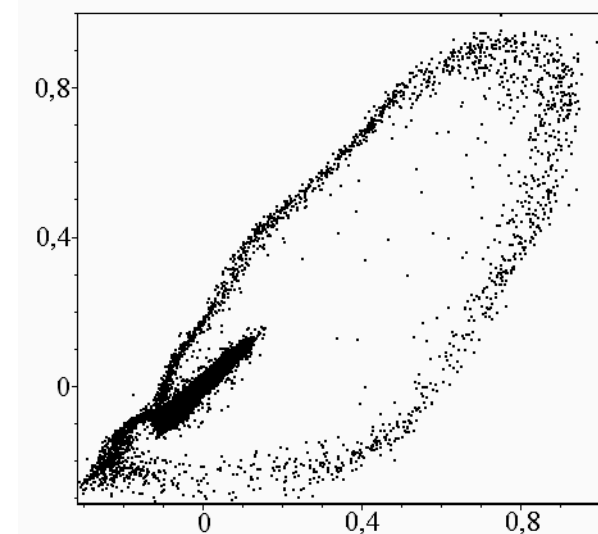
а - диаграмма Пуанкаре и исходная ЭКГ пациента №1 (здорового); б - они же после фильтрации

# Идентификация состояния сердца



В

в - диаграмма Пуанкаре пациента №2  
(здорового)



Г

г - диаграмма Пуанкаре пациента №3  
(с патологией)

## **Изменение диаграммы Пуанкаре**

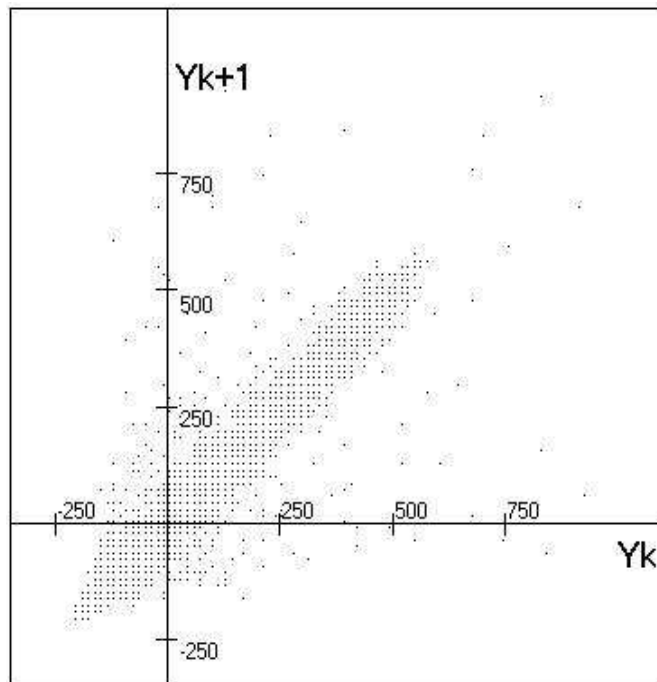
**позволяет обнаружить изменение состояния (патологию).**

**После составления атласа диаграмм Пуанкаре для различных патологий можно будет диагностировать болезнь.**

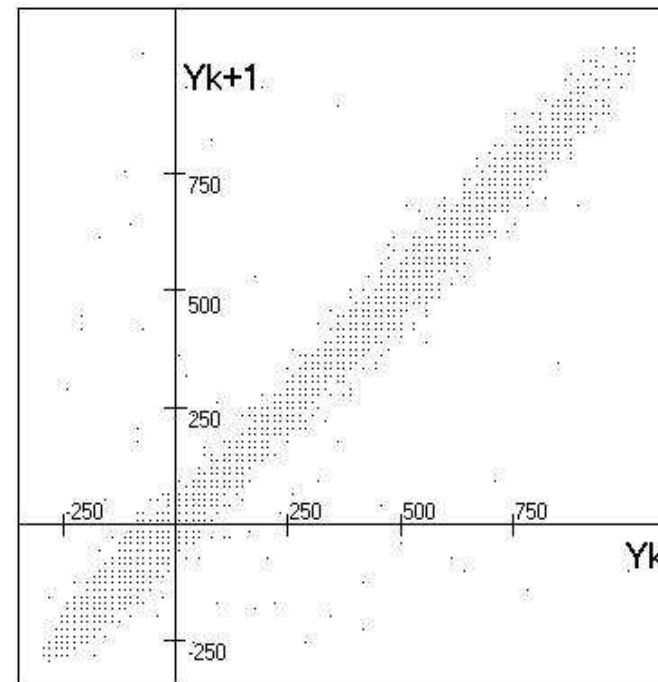
**Глобальный дистанционный кардиомониторинг населения возможен для ранней профилактики сердечных заболеваний.**

# Объект 2 – региональная геологическая среда в окрестности г. Петропавловска на Камчатке (радиусом ~ 500 км.)

*Измеряемый параметр – уровень геоакустической эмиссии (шума) на глубине 1035 м. в вертикальной скважине.*



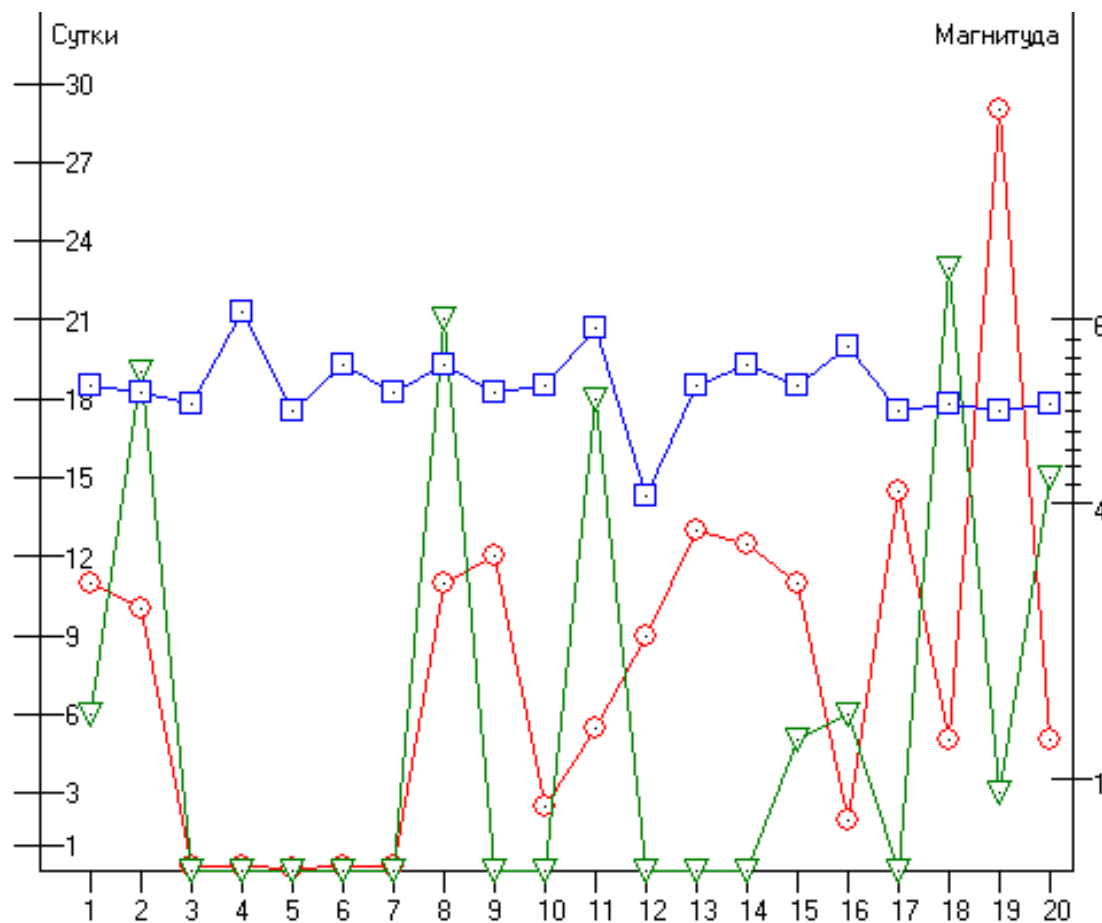
а) Ранее 9 дней до землетрясения



б) На 9-ти дневном периоде вплоть до землетрясения



# Оценки времени предвестия для 20 землетрясений на Камчатке по изменению диаграммы Пуанкаре (a' posteriori)



## Сводные результаты:

**кружочки** – результаты феноменологической обработки,  
**треугольники** – результаты, взятые из статьи Гаврилова и др. (нулевым значениям соответствует отсутствие данных),  
**квадратики** – магнитуды землетрясений.

**По оси ординат** – интервал времени от момента изменения диаграммы Пуанкаре, предшествующего землетрясению, до момента этого землетрясения.

**По оси абсцисс** – порядковый номер землетрясения.

Соединение отрезками прямых на графиках является условным – для наглядности.

# Феноменологическое уравнение

Математическое уравнение называется феноменологическим, когда оно описывает сложную систему упрощенно – как «черный ящик», по принципу лишь хорошей воспроизводимости наблюдаемого параметра (параметров).

Для его построения необходимы только экспериментальные данные и не требуются априорные сведения о внутренней структуре и (даже) о физической природе системы, что придает ему черты универсальности для систем из различных предметных отраслей.

## Метод построения феноменологического уравнения

19

Пусть  $x_k = x(t_k)$  - наблюдаемый параметр системы,  $t_k, k = 1, 2, \dots, N$  - дискретное время,  $N$  - объем выборки.

Отыскиваем уравнение системы в виде

$$x_k = f(x_{k-1}, x_{k-2}, \dots, x_{k-\eta}, a) + \xi_k; f \in F.$$

Здесь  $f(\cdot)$  - искомая функция, принадлежащая некоторому выбранному классу функций  $F$ ;

$\eta$  - искомый порядок уравнения;  $\xi_k$  - рассматривается как погрешность модели,  $a$  - параметр состояния.

Критерий оптимальности:

$$\{f_{opt}, \eta_{opt}\} = \arg \min_{f \in F, \eta} \sigma^2, \quad (*)$$

$$\sigma^2 = m[x_k - f(x_{k-1}, x_{k-2}, \dots, x_{k-\eta}, a)]^2, \quad k > \eta,$$

где  $m[\cdot]$  - оператор математического ожидания.

Метод разработан в классе степенных рекуррентных алгебраических полиномов

$$f(x_{k-1}, x_{k-2}, \dots, x_{k-\eta}) = a_0 + \sum_{q_1=1}^{\eta} a_{q_1} x_{k-q_1} + \sum_{q_1=1}^{\eta} \sum_{q_2=1}^{q_1} a_{q_1 q_2} x_{k-q_1} x_{k-q_2} + \dots \\ + \sum_{q_1=1}^{\eta} \sum_{q_2=1}^{q_1} \dots \sum_{q_v=1}^{q_{v-1}} a_{q_1 \dots q_v} x_{k-q_1} x_{k-q_2} \dots x_{k-q_v},$$

Задача свелась к нахождению оптимальных значений степени  $v$ , порядка  $\eta$  и коэффициентов  $\{a_0, a_{q_1}, \dots\}$ , из условия (\*).

# Пример: построение феноменологического уравнения объекта 2 по геоакустограмме

Искомое уравнение является разностным 2-й степени и 2-го порядка

$$X_{k+2} = a_0 + a X_{k+1} + b X_k + c X_{k+1}^2 + d X_k^2 \quad (1)$$

где  $X_k$  - значения исходной последовательности. Дмножая левую и правую части по очереди на 1,  $X_{k+1}$ ,  $X_k$ ,  $X_{k+1}^2$ ,  $X_k^2$  и применяя почленно оператор математического ожидания  $m[\cdot]$ , получим систему алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} m[x_{k+2}] = a_0 + am[x_{k+1}] + bm[x_k] + cm[x_{k+1}^2] + dm[x_k^2] \\ m[x_{k+2}x_{k+1}] = a_0m[x_{k+1}] + am[x_{k+1}^2] + bm[x_kx_{k+1}] + cm[x_{k+1}^3] + dm[x_k^2x_{k+1}] \\ m[x_{k+2}x_k] = a_0m[x_k] + am[x_{k+1}x_k] + bm[x_k^2] + cm[x_{k+1}^2x_k] + dm[x_k^3] \\ m[x_{k+2}x_{k+1}^2] = a_0m[x_{k+1}^2] + am[x_{k+1}^3] + bm[x_kx_{k+1}^2] + cm[x_{k+1}^4] + dm[x_k^2x_{k+1}^2] \\ m[x_{k+2}x_k^2] = a_0m[x_k^2] + am[x_{k+1}x_k^2] + bm[x_k^3] + cm[x_{k+1}^2x_k^2] + dm[x_k^4] \end{cases} \quad (2)$$

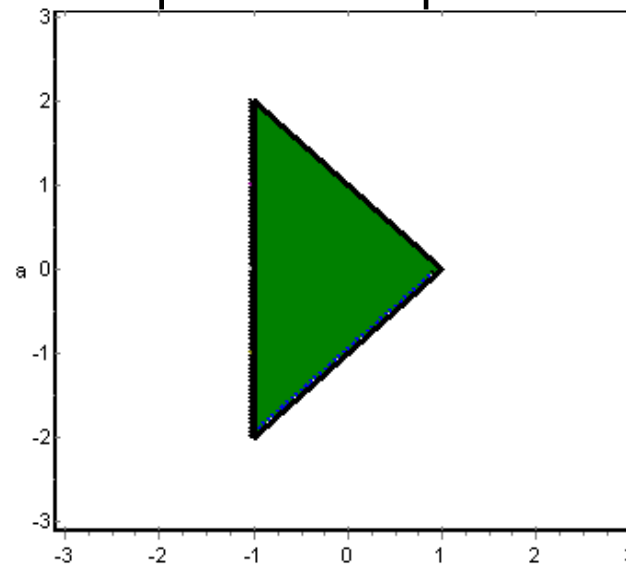
Входящие в систему уравнений значения  $m[\cdot]$  вычисляются по нормированной экспериментальной последовательности значений как выборочные статистические средние. Затем система решается относительно коэффициентов  $a_0, a, b, c, d$  методом Гаусса.

# Анализ уравнения (1)

21

Коэффициенты  $a$  и  $b$  при первых степенях – это параметры состояния объекта, которые определяют тип его поведения как коллектива элементов (макродинамику). Коэффициенты  $c$  и  $d$  при квадратичных членах определяют энергетическую накачку/откачку, вызванную либо внешними энергетическими воздействиями, либо “самовозбуждением”.

Поле решений при  $c=d=0$

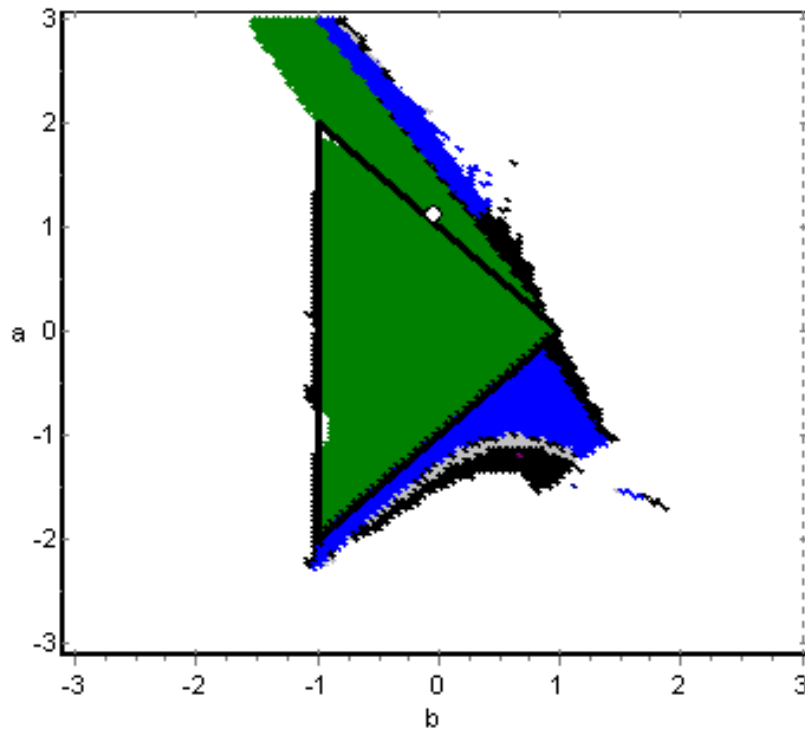


**Зеленая область** – ОСР (область сходящихся решений) – устойчивое поведение объекта. **Черные границы** – незатухающие колебания – критическое поведение объекта. **Белая область** – расходящиеся решения – разрушение объекта.

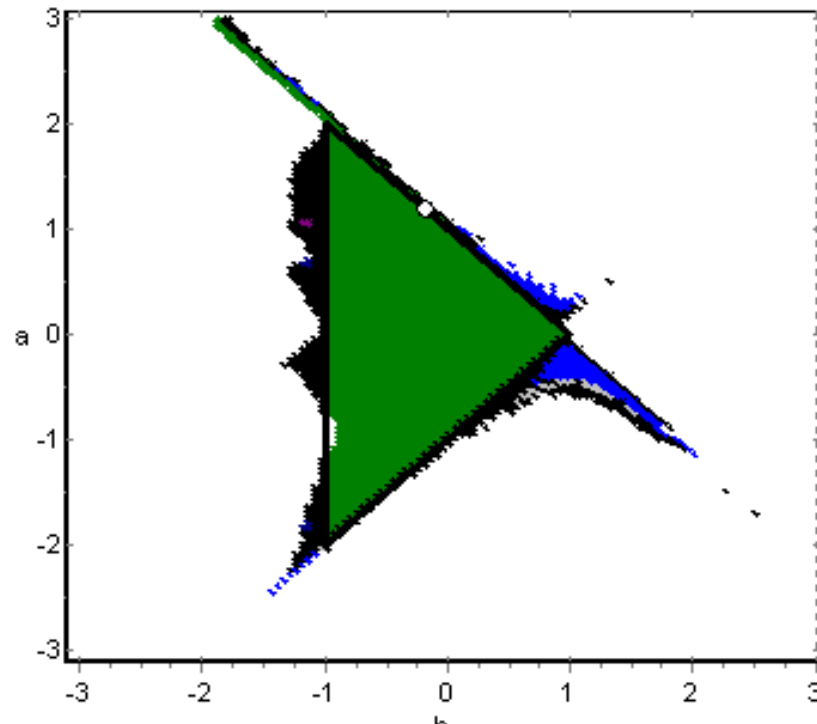
# Пространство состояний объекта 2

при  $c \neq 0$  и  $d \neq 0$

Рисунки а, б относятся к двум периодам эволюции объекта (см. слайд 16).  
Точка на рис.– фактическое состояние объекта.  
Синяя область – циклические колебания.



а



б

# Материалы по теме

23

## *Теоретическая база предложенных методов*

Новоселов О. Н. Идентификация и анализ динамических систем: монография / 2-е изд.-М.: Изд-во Моск. гос. ун-та леса, 2007.- 316с.

## *Программное обеспечение*

Компьютерная программа **ANDYNSYS** для пользователя

( авторы: О.Н. Новоселов,  
А.В. Афанасьев,  
В.В. Афанасьева

Московский государственный университет леса, 2008. )

## *Некоторые прикладные результаты*

- 1. Гаврилов В.А., Гуфельд И.Л., Новоселов О.Н., Хрулев Е.Н. Геоакустический мониторинг сейсмоактивной геологической среды на Петропавловском полигоне, Камчатка. – В сб. Изменяющаяся геологическая среда: пространственно-временные взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов: Материалы международной конференции. Том 2: г. Казань, 13 – 16 ноября 2007г. / Сост. Н.Н. Раилова. – Казань : Изд-во Казанского гос. ун-та, 2007. – 348 с.; С. 28 – 31.**
- 2. Гуфельд И.Л., Новоселов О.Н. Пространственные геофизические процессы, инициирующие возмущения атмосферы и ионосферы перед сильными коровыми землетрясениями. – Доклад на данной конференции в секции «Дистанционные исследования в геологии и геофизике», 2008.**