

**Институт проблем математических машин и систем
НАН Украины**

Проблемы точности измерений

ГОРБАНЬ ИГОРЬ ИЛЬИЧ

д.т.н., профессор

г. Киев

Проблемы точности измерений

*Развитие науки и техники неразрывно связано с решением **проблем точности измерений***

Основные вопросы:

- как повысить точность измерений?
- почему точность любых **реальных измерений** имеет предел, хотя согласно теории вероятностей точность состоятельных оценок не ограничена?
- каковы **реальные границы** точности?

Структура доклада

Часть 1. – Проблемы точности измерений в гидроакустике

Часть 2. – Проблемы реализации измерений с помощью мобильных гидроакустических станций (ГАС)

Часть 3. – Проблема нарушения статистической устойчивости

*Основное внимание уделено
новым идеям, принципам и подходам*

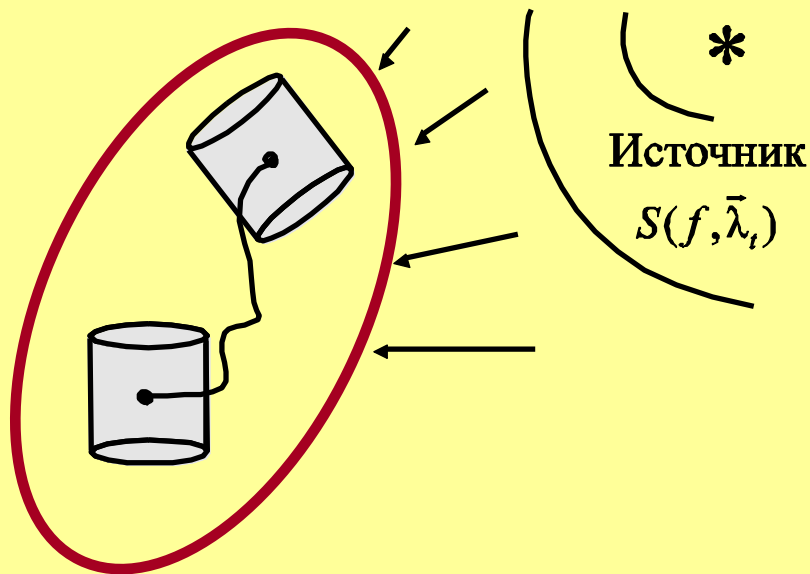
Часть 1. Проблемы точности в гидроакустике



- сложная помеховая обстановка,
- существенно неоднородная среда распространения колебаний,
- сложное перемещение антенн в пространстве (в случае мобильных ГАС)

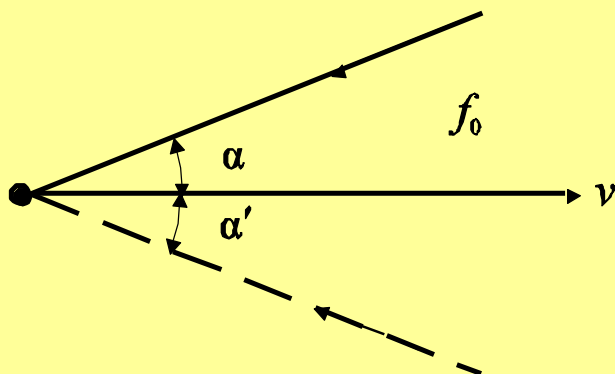
Стратегия – комплексная оптимизация обработки с учетом условий излучения, распространения, отражения и приема сигнала

Результаты исследования (1)



При сложном движении антенны потенциальная точность измерения угловых параметров сигнала определяется не размерами антенны, как в статических условиях, а **размерами области пространства, в которой перемещается антенна**

Результаты исследования (2)

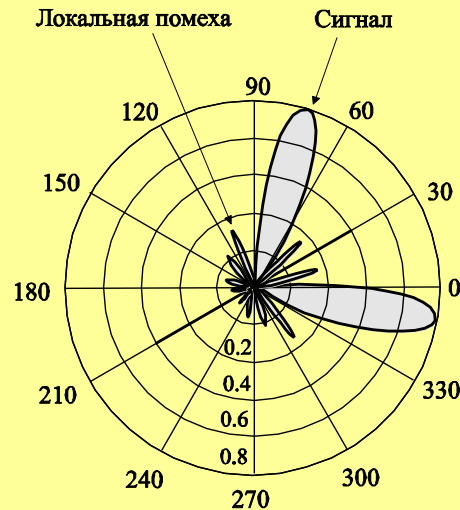
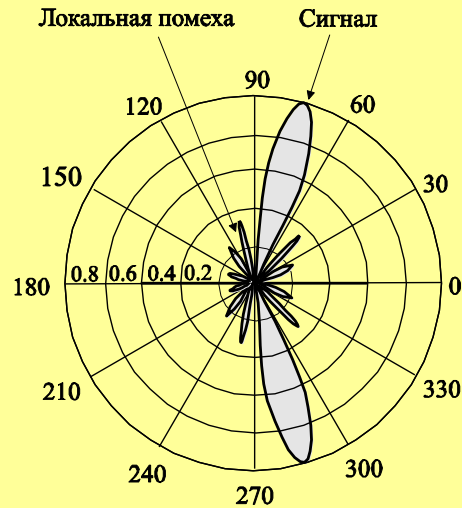


$$f_d = f_0 \left(1 + \frac{v}{c} \cos \alpha \right)$$

$$f_d(t) = f_0 \left(1 + \frac{v(t)}{c} \cos \alpha \right)$$

В отличие от систем с синтезированной апертурой (когда антенна движется с постоянной скоростью) **повышение точности измерения угловых параметров сигнала оказывается возможным даже в том случае, когда неизвестны частота сигнала или доплеровский сдвиг частоты**

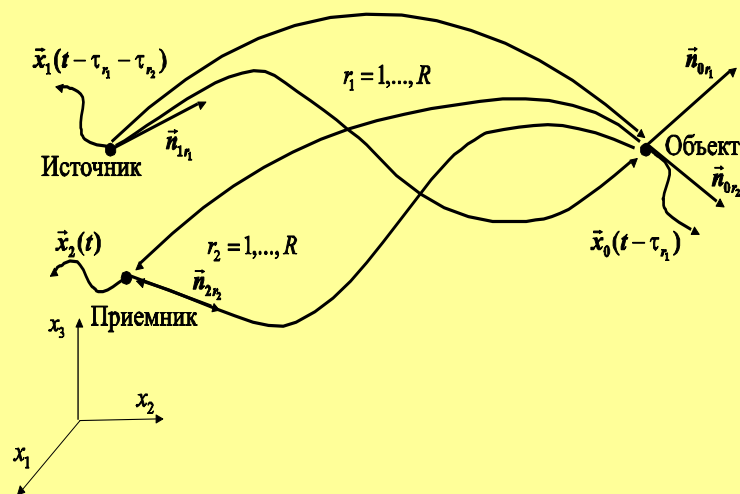
Результаты исследования (3)



Возможно целенаправленное использование движения антенны для решения задач, которые не могут быть решены в статических условиях, например, устранение неоднозначности определения направления прихода сигнала при применении линейной антенны и др.

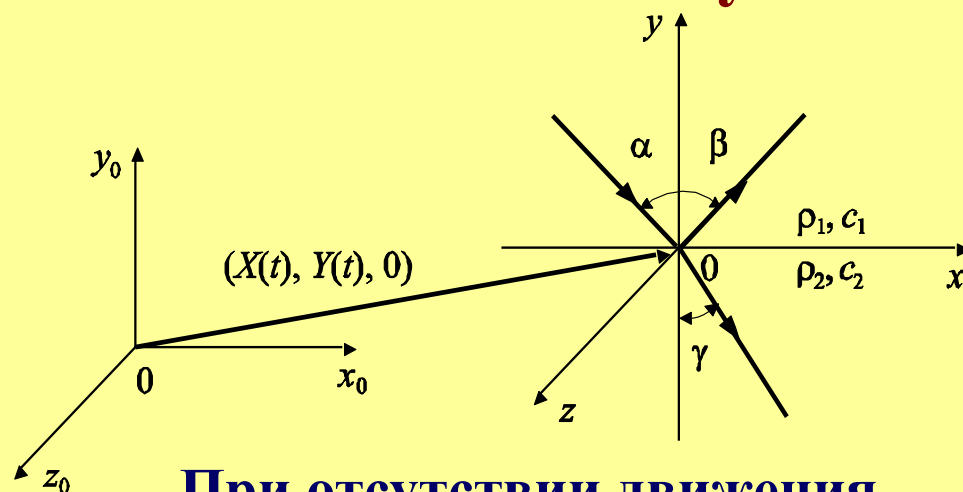
Результаты исследования (4)

Эффект Доплера



$$f_{2r_2}(t) = \frac{(1 - \vec{n}_{0r_1} \vec{x}'_{0r_2})(1 + \vec{n}_{2r_2} \vec{x}'_2)}{(1 - \vec{n}_{2r_2} \vec{x}'_{1r_2})(1 + \vec{n}_{0r_2} \vec{x}'_{0r_2})} f_1$$

Законы Снеллиуса



При отсутствии движения

$$\alpha = \beta,$$

$$\sin \alpha / \sin \gamma = c_1 / c_2$$

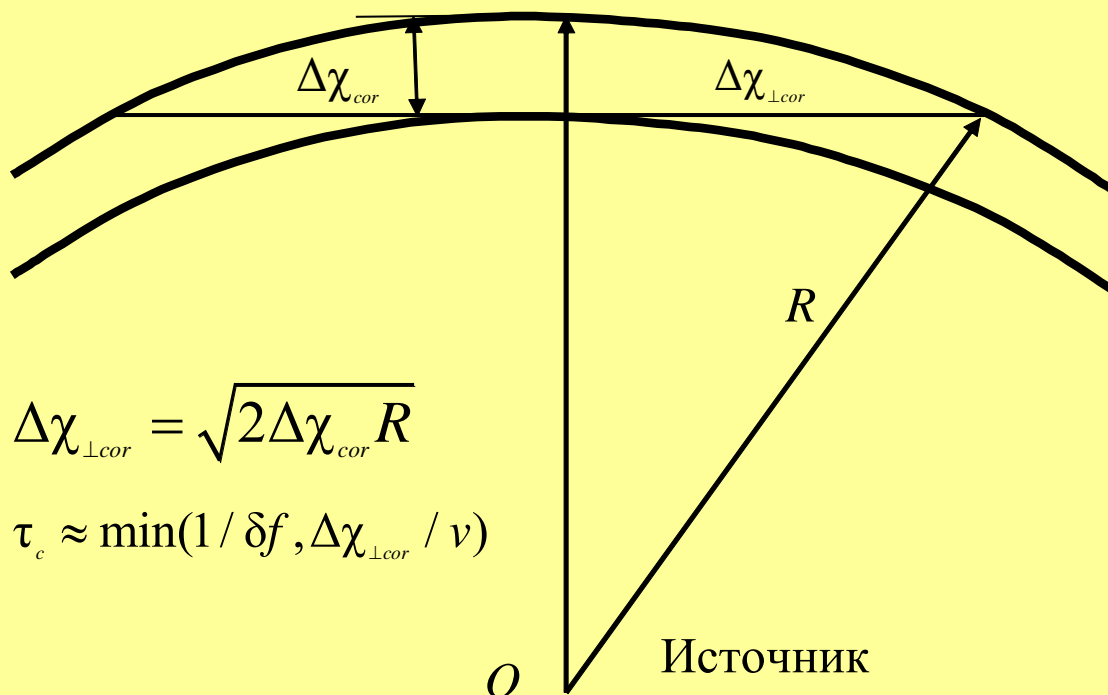
При наличии движения

$$\alpha \neq \beta,$$

$$\sin \alpha / \sin \gamma \neq c_1 / c_2$$

Результаты исследования (5)

Динамическая модель нарушения когерентности сигнала



*Интервалы пространственной и временной корреляции определяются параметрами неоднородности среды и **движения** **корреспондирующих элементов***

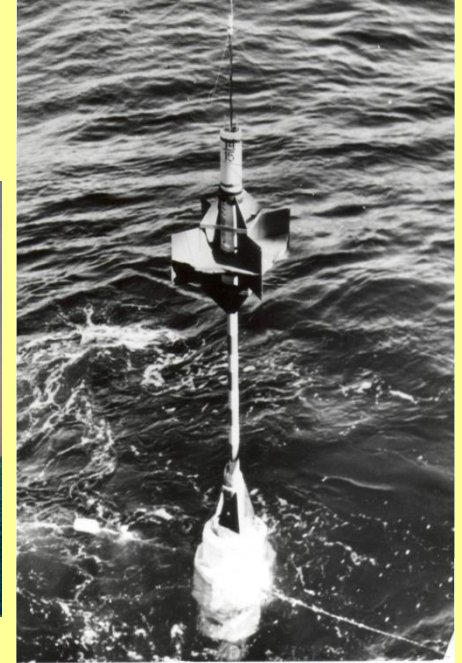
Научные экспедиции в Тихом и Северо-Ледовитом океанах



НИС
«Академик М.А. Лаврентьев»



НИС
«Академик А.П. Виноградов»



РГИС

Основные научные результаты:

- **разработана и экспериментально подтверждена динамическая модель нарушения когерентности сигнала;**
- **подтверждена на практике возможность использования динамических эффектов**

Основные результаты

- Показано, что **волнение** океана, традиционно рассматриваемое как выраженный **дестабилизирующий фактор**, может способствовать **улучшению характеристик гидроакустических станций**
- **Взамен** общепринятой стратегии **борьбы** с дестабилизирующими факторами предложена **новая стратегия использования дестабилизирующих факторов** в интересах повышения потенциала гидроакустических средств

Часть 2. – Проблема реализации для подвижных антенн

Особенность: количество каналов параллельной обработки ГАС **достигает нескольких миллионов**

Базовая часть обработки:

- для линейной неподвижной антенны – двумерное преобразование Фурье

$$\dot{Q}(\vec{\lambda}) = \iint_{TX} u(t, x) \exp[j2\pi f(t - n_{\mu}x)] dt dx;$$

- в общем случае

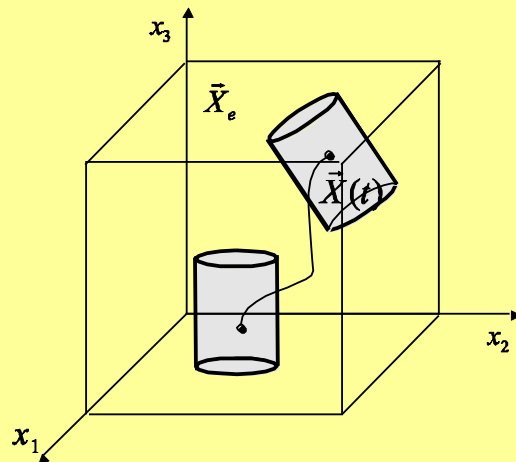
$$\dot{Q}(\vec{\lambda}) = \iint_{\Omega} u(t, \vec{x}) b^*(t, \vec{x}, \vec{\lambda}) dt d\vec{x}$$

Известные быстрые алгоритмы обработки сигналов:

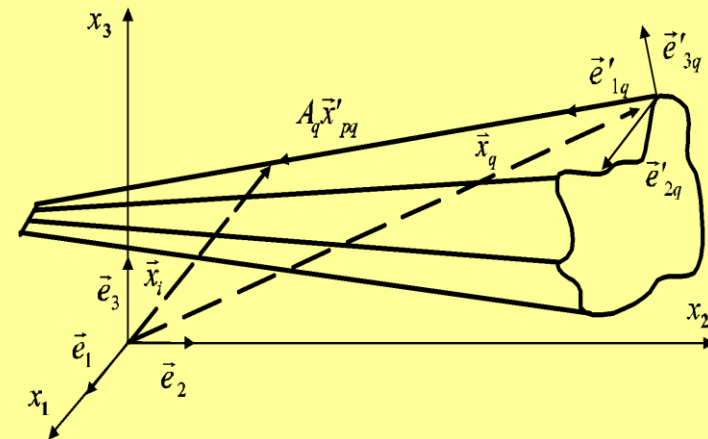
- применимы только для неподвижных антенн простейшей формы;
- **неприменимы** для подвижных антенн

Теория быстрой многоканальной обработки гидроакустических сигналов

Быстрые алгоритмы
с расширением выборки поля



Быстрые алгоритмы
секционированной обработки

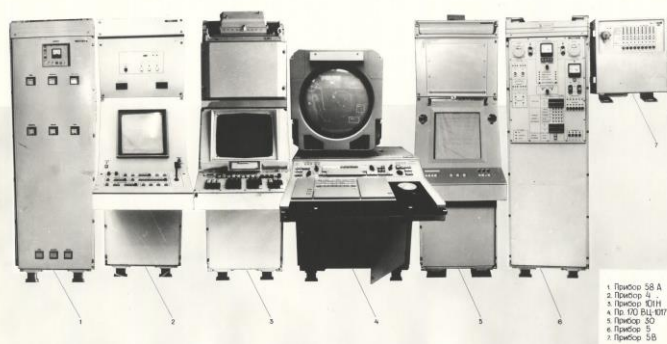


Разработанные быстрые алгоритмы

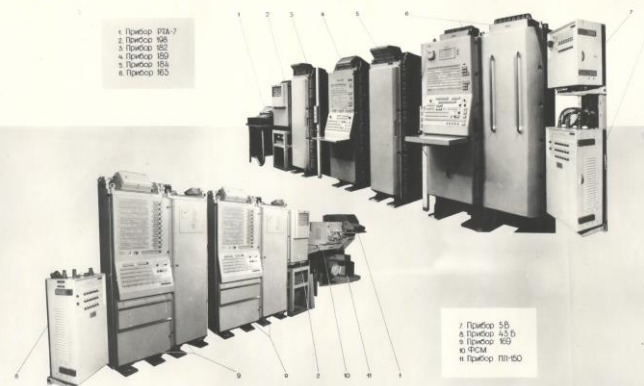
- в сотни раз экономичнее известных алгоритмов, включая быстрые;
- применимы для антенн сложной формы и подвижных антенн

Гидроакустическая станция «Кентавр-СК»

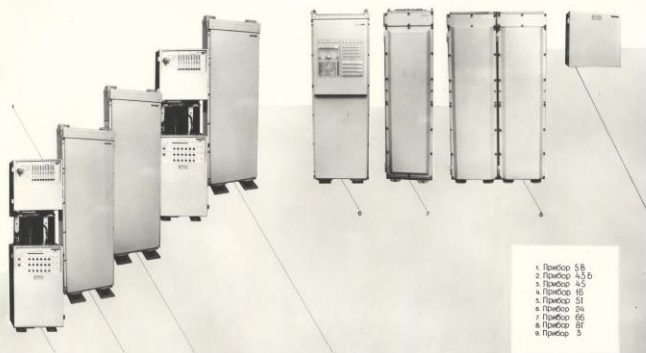
РАБОЧЕЕ МЕСТО ОПЕРАТОРОВ



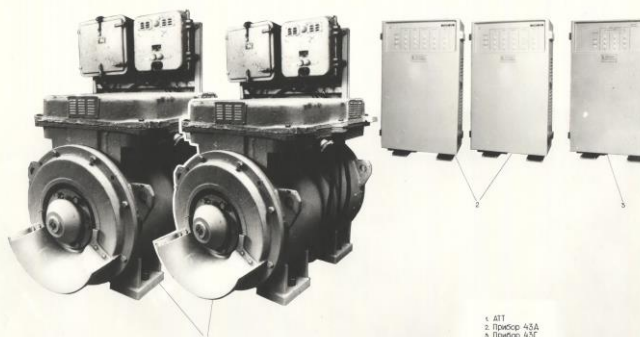
ЦИФРОВОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС



**АППАРАТУРА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ
ИНФОРМАЦИИ И КОНТРОЛЯ**



ГЕНЕРАТОРНО-РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА



Носитель гидроакустической станции «Кентавр -СК»



Морской буксир (проект 745)

Внедрение

ГАС «Кентавр» - первый заместитель ГК,

- **«Кентавр-СК» - первый заместитель ГК,**
- **«Эверест»,**
- **«Луч-3» - Главный конструктор,**
- **«Звезда»,**

РЛС «МР 244-2М»

ГАС «Виньетка - ЭМ» (Россия)

Гидролокация

Дальность обнаружения **ПЛ**

в мелком море **10-20 км**

в глубоком море **15-60 км**

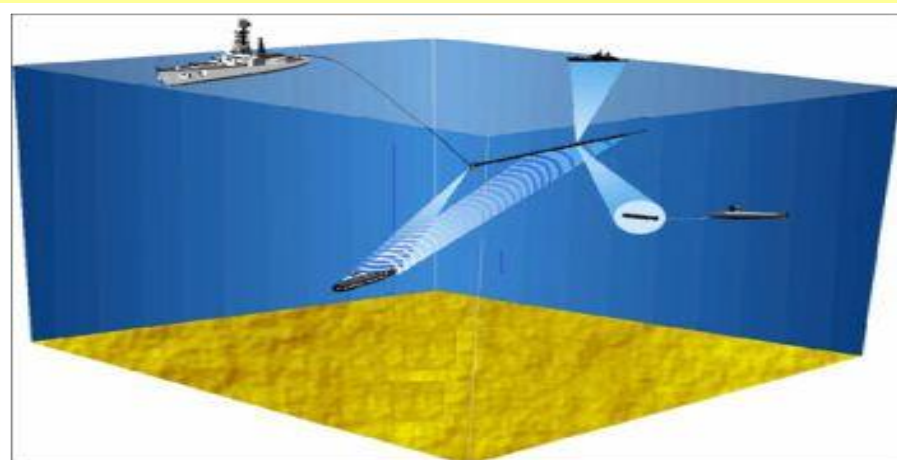
Сектор обзора
(курсовые углы) **± 180 град**

Точность определения координат
целей в режиме автоматического
их сопровождения:

пеленга **2 град**

дальности **1% от
шкалы**

Скорость буксировки **до 18 узлов**



Шумопеленгование

Дальность обнаружения

торпеды **15-30 км**

надводного корабля **30-100 км**

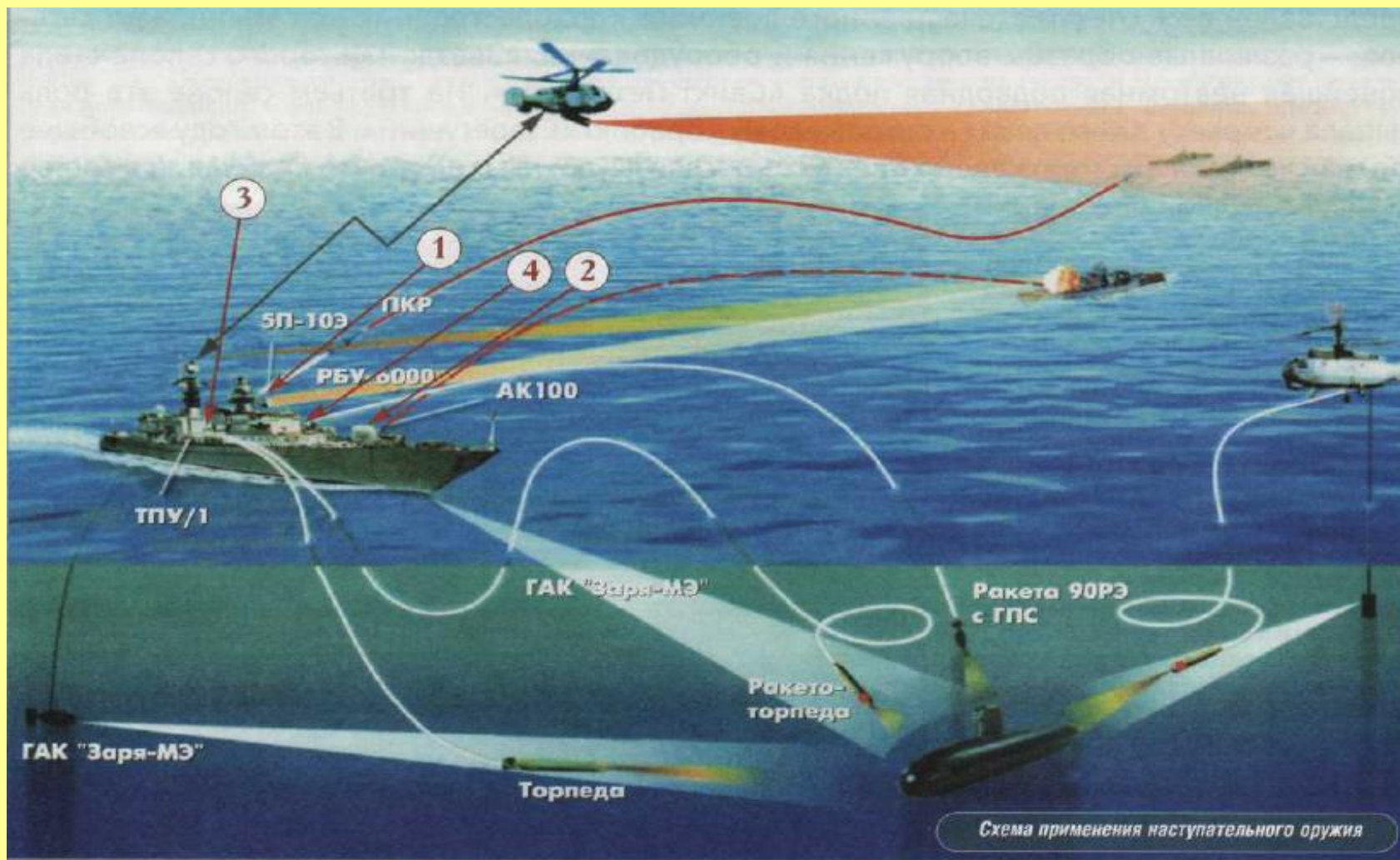
ПЛ **15-20 км**

Точность пеленгования в
траверзных углах и на
прямом галсе носителя: **2 град**

Скорость буксировки **до 14 узлов**

Эксплуатация ГАС
при волнении моря **до 5
баллов**

ГАК «Заря МЭ» (Россия)

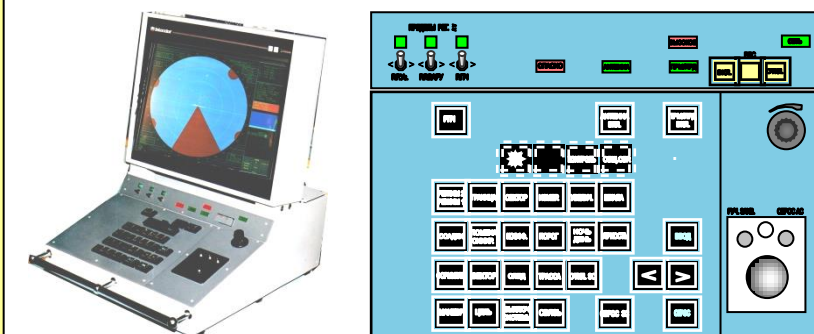


РЛС МР-244-2М (Украина)

Графика экрана



Пульт оператора



РЛС обеспечивает:

- освещение надводной обстановки;
- определение координат целей;
- длительное сопровождение целей;
- автоматический и ручной захват целей на сопровождение;
- решение навигационных задач;
- выдачу данных целеуказания.

Особенности:

- цифровая обработка сигналов;
- широкие функциональные возможности;
- архивирование обстановки;
- дружественный интерфейс оператора.

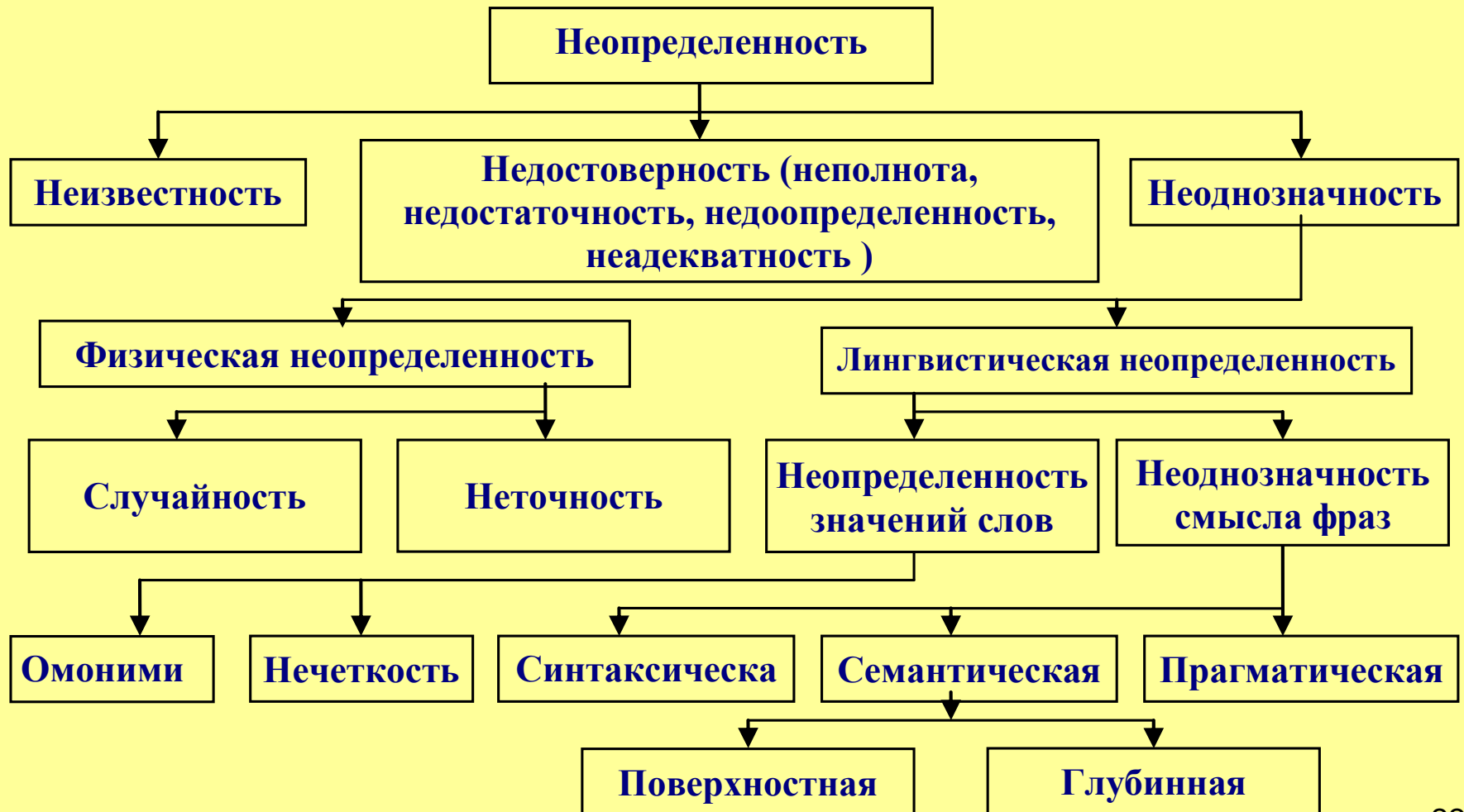
Часть 3. – Проблема нарушения статистической устойчивости

Качество обработки зависит от адекватности представления и статистической устойчивости сигналов, помех и условий работы

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

- **детерминированные** (математически полностью определенные);
- **недетерминированные** (неопределенные):
 - **случайные (стохастические)**, описываемые **определенными** законами распределения
 - **нестохастические, не описываемые** определенными законами распределения

КЛАССИФИКАЦИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ



Феномен статистической устойчивости частоты



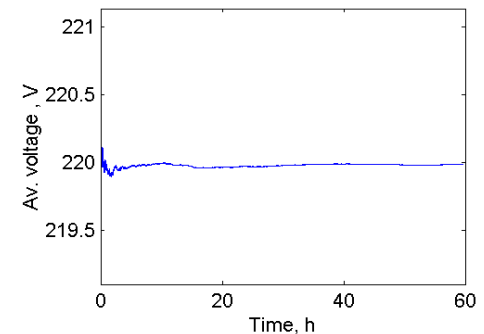
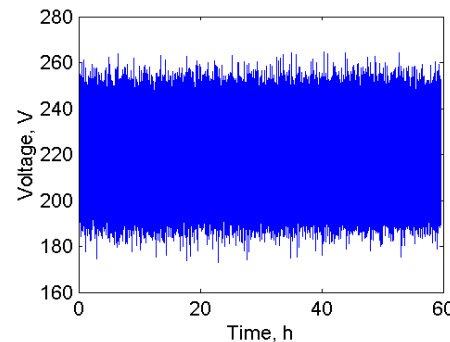
Феномен статистической устойчивости частоты событий – физический феномен сходимости выборочного среднего

Модели статистически устойчивых процессов

Статистически устойчивый процесс – процесс (не обязательно случайный), у которого флуктуации выборочного среднего стремятся к нулю

1. Белый гауссовский шум

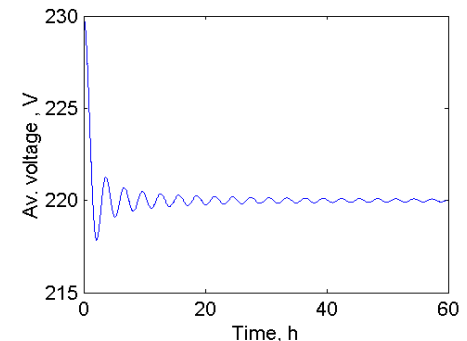
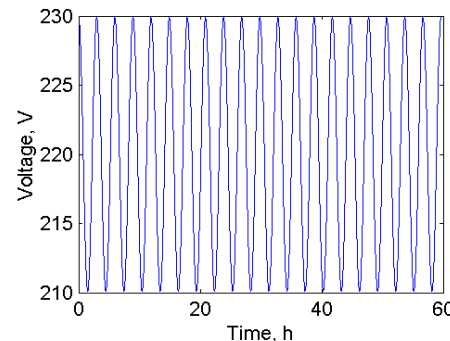
$$x_n = 220 + 10n_n$$



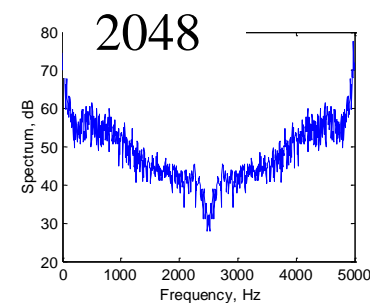
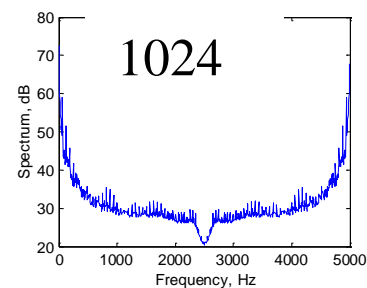
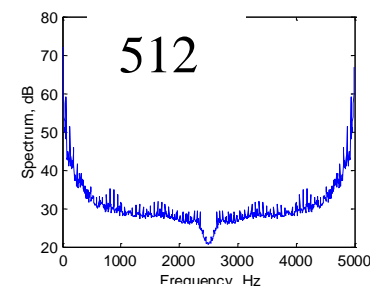
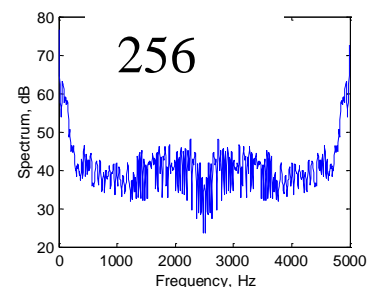
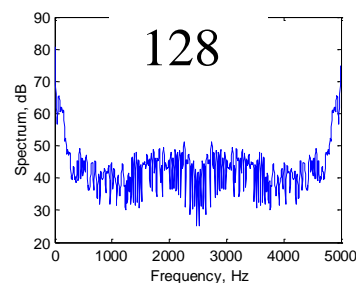
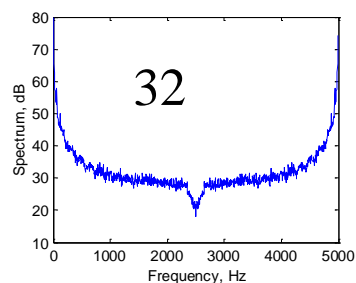
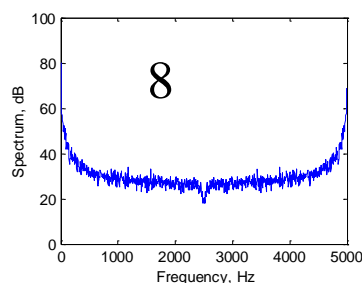
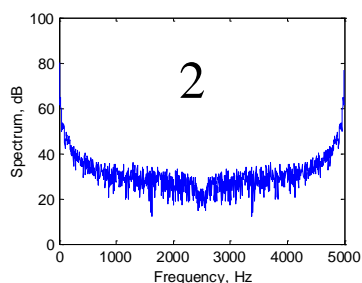
2. Гармоническое колебание

$$x_n = 220 + 10\cos(2\pi f n / N)$$

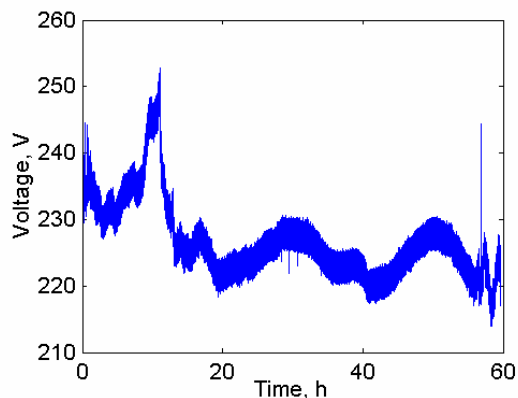
($f = 20$)



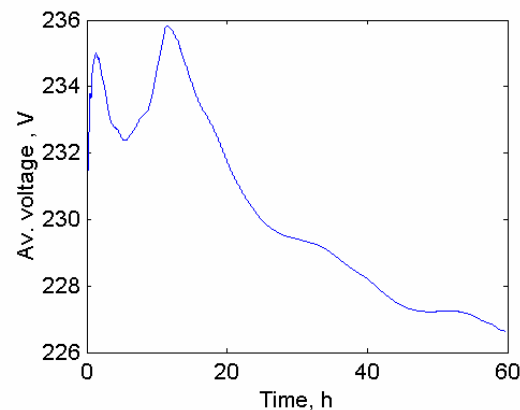
Спектр шумов усилителя



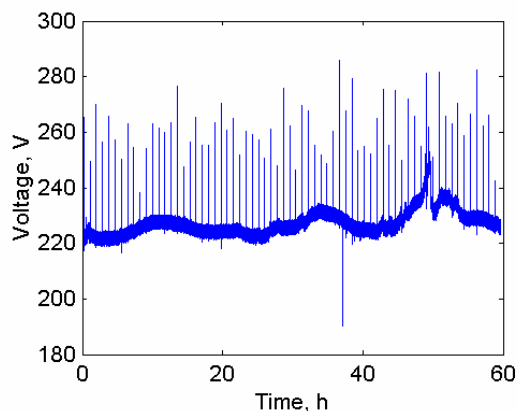
Колебание напряжения городской электросети



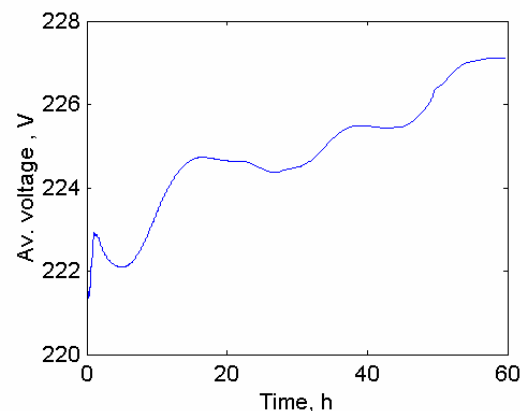
a



б

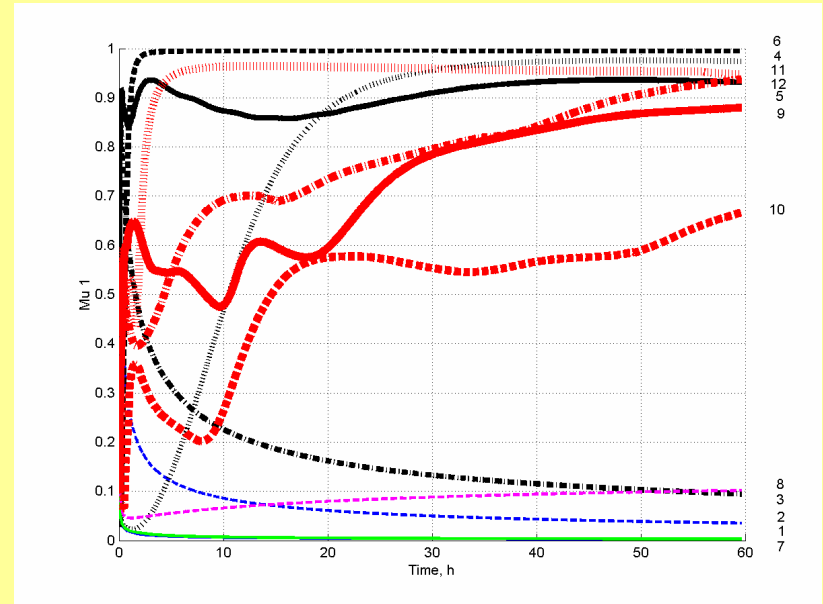
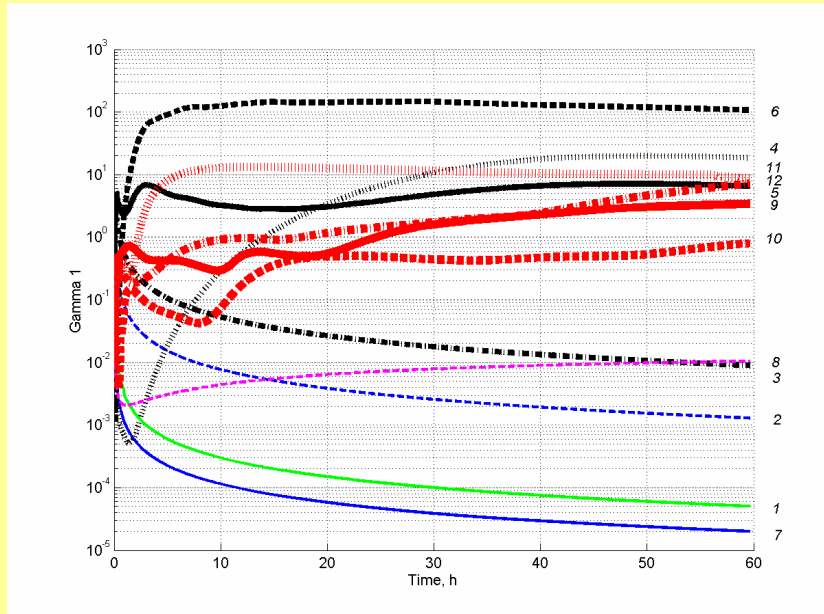


в



г

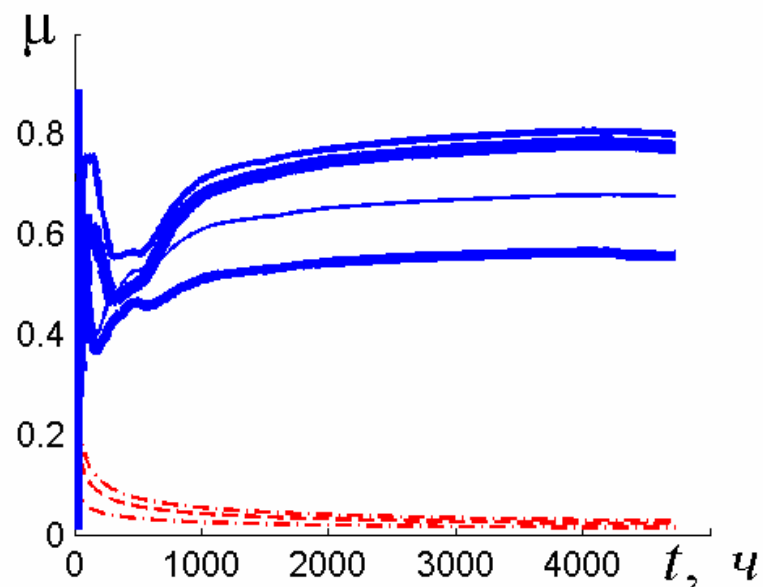
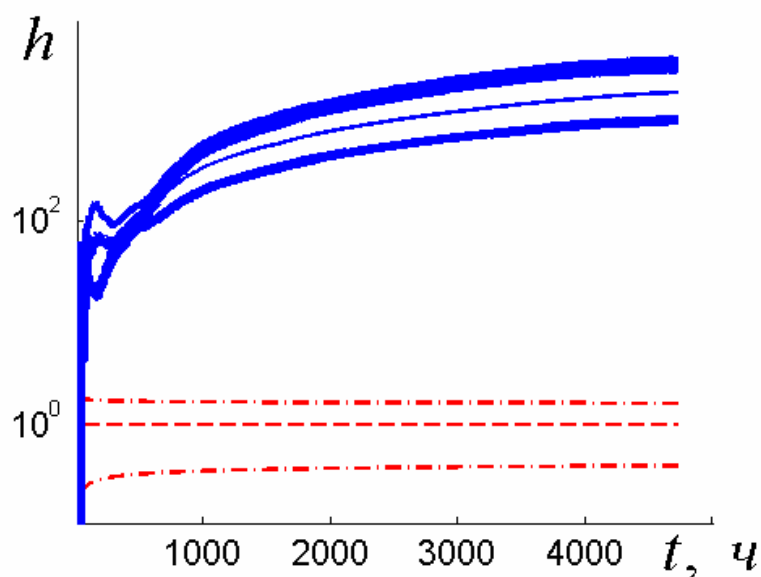
Параметры статистической неустойчивости напряжения электросети



$$\gamma_N = \frac{M[\bar{D}_{Y_N}]}{\bar{D}_{x_N}}$$

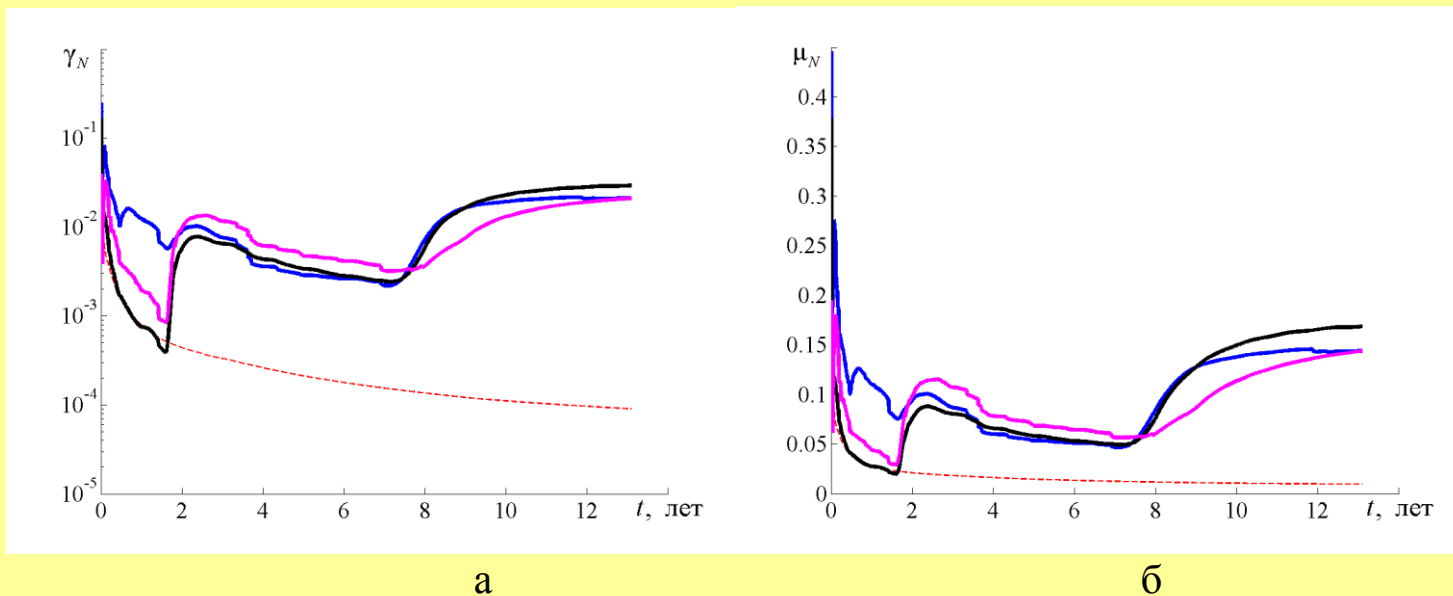
$$\mu_N = \sqrt{\frac{\gamma_N}{1 + \gamma_N}}$$

Нарушение статистической устойчивости температуры воды в Тихом океане



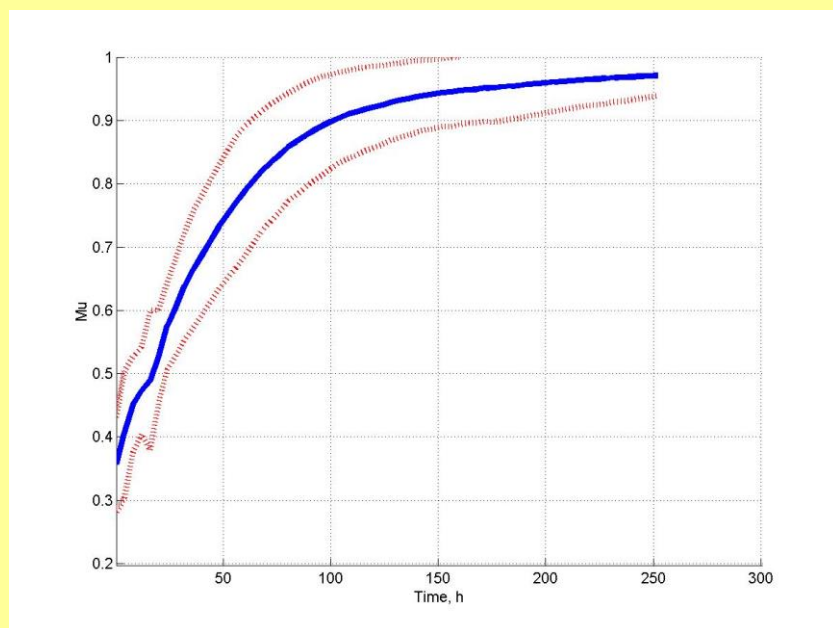
Параметры статистической неустойчивости для данных, полученных после НЧ фильтрации, компенсирующей сезонные колебания температуры

Нарушение статистической устойчивости магнитного поля Земли

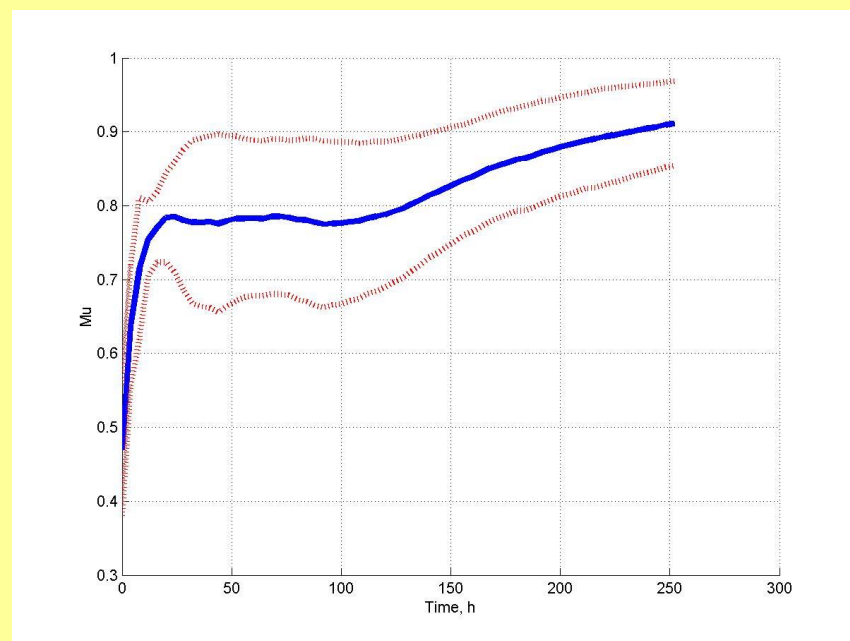


Вывод: при длительном наблюдении во всех исследованных процессах наблюдались нарушения статистической устойчивости

Параметр статистической неустойчивости котировки валют



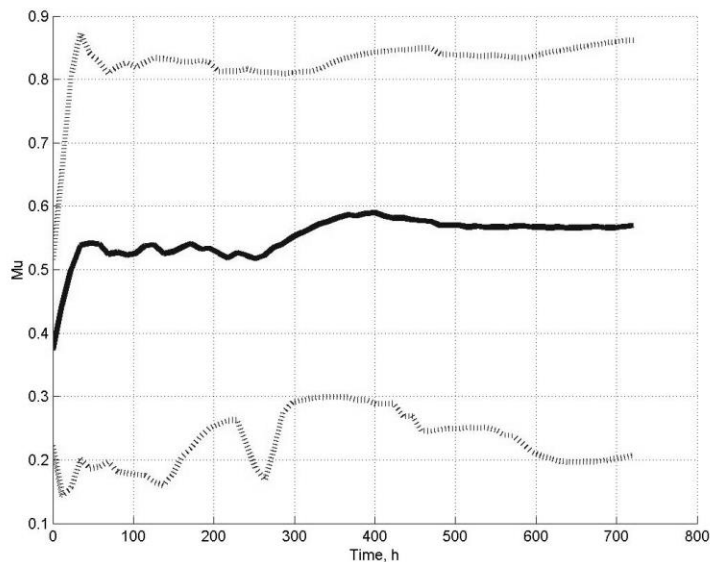
a



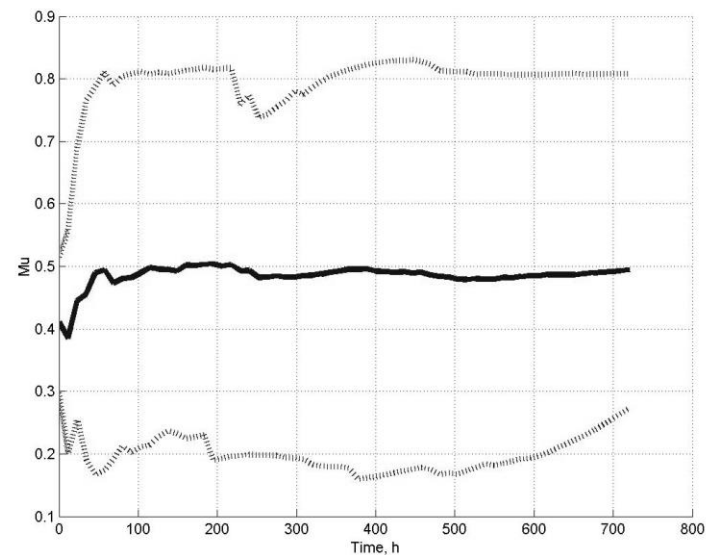
б

Усредненный по 16 декадам параметр статистической неустойчивости (непрерывная кривая) и диапазон изменения этого усредненного параметра, определяемый СКО, (пунктирные кривые) для котировки австралийского доллара (AUD) по отношению к доллару США (USD) за 2001 г. (a) и 2002 г. (б)

Параметры статистической неустойчивости волнения моря



Высота волн



Период следования волн

Параметры статистической неустойчивости колебаний температуры воздуха и количества осадков

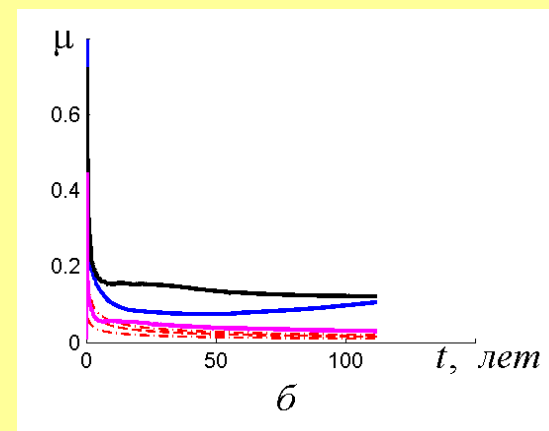
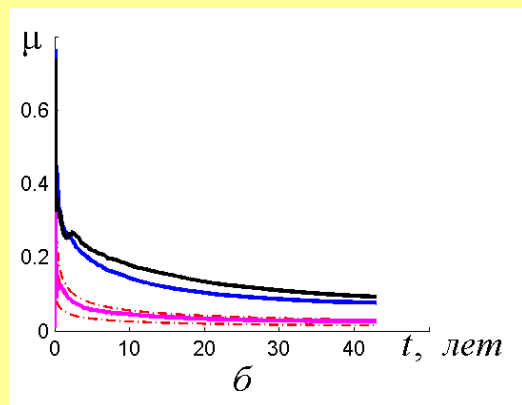
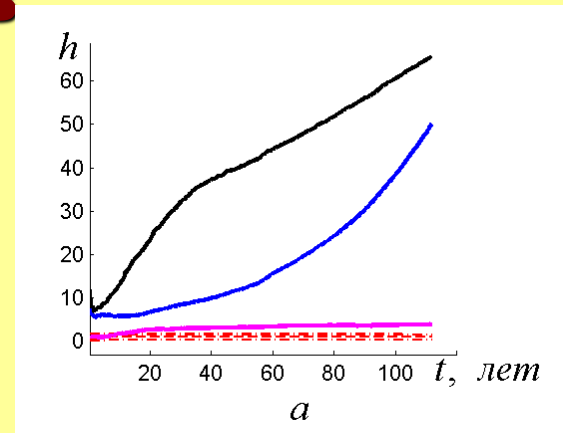
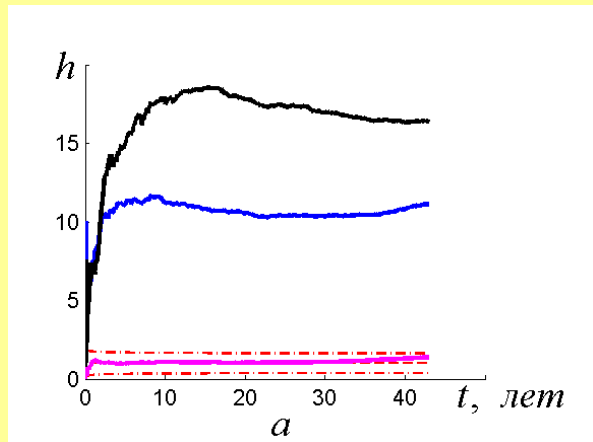
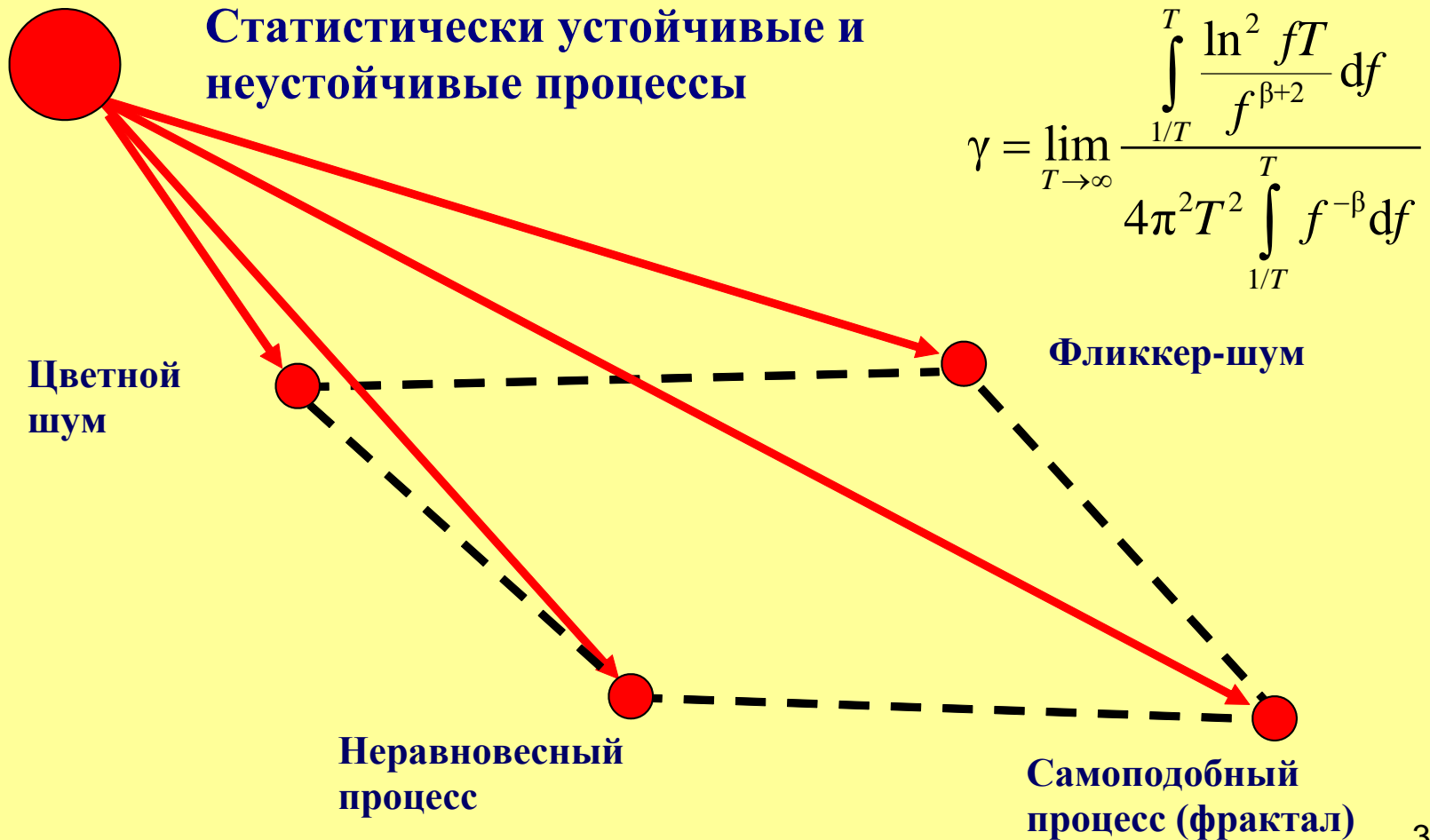


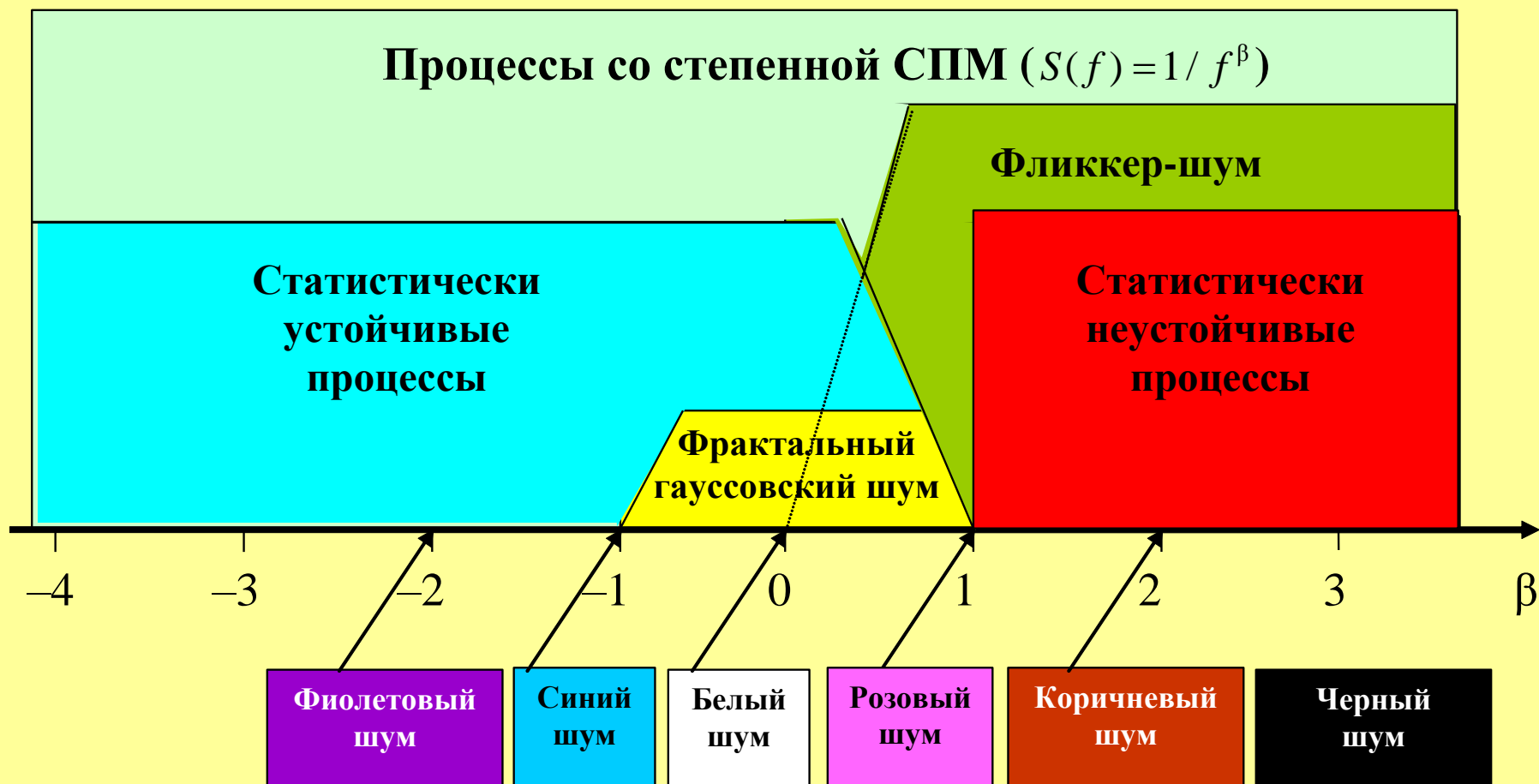
Рис. 1. Изменение во времени параметров статистической неустойчивости для Москвы

Рис. 2. Изменение во времени параметров статистической неустойчивости для Киева

Процессы со степенной СПМ $1 / f^\beta$



Процессы со степенной СПМ



Основная проблема

Реальные процессы - **статистически неустойчивые**.

Они **не описываются** конкретными функциями
распределения.

Их **выборочные средние расходятся**.



$$P_o \neq P_p \neq 0,5$$

$$v_1 \leq \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_o}{N} \leq v_2$$

**КАК ОПИСЫВАТЬ ПРОЦЕССЫ С
РАСХОДЯЩИМИСЯ СРЕДНИМИ?**

Физико-математическая теория гиперслучайных явлений

Особенности теории:

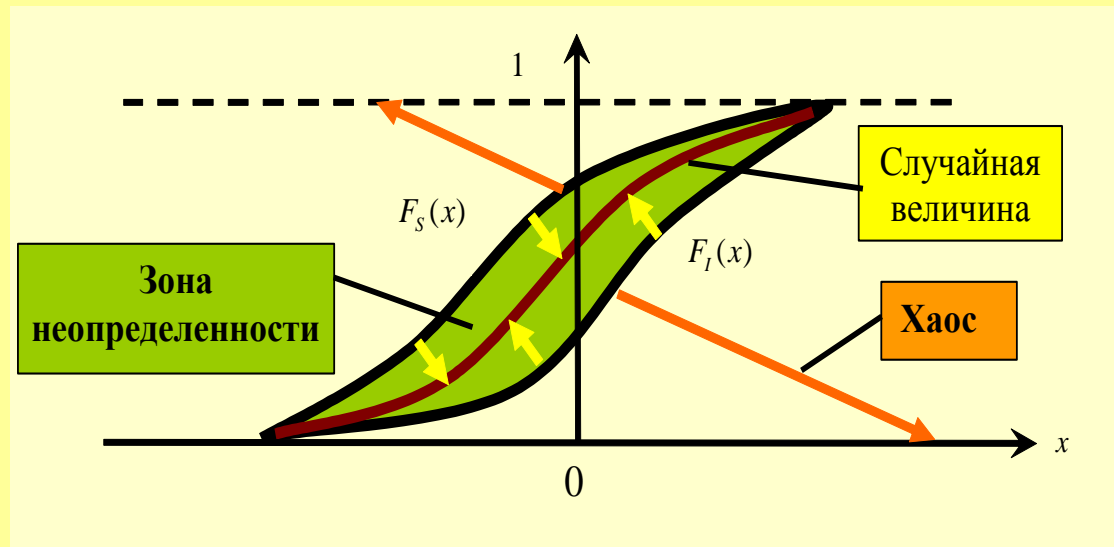
- сформирована на основе аксиоматики теории вероятностей;
- ориентирована на описания статистически нестабильных физических явлений

Гиперслучайная величина X –
семейство случайных величин:

$$X = \{X / g \in G\}$$

Теория

- разработана для гиперслучайных
 - событий • величин • функций • функционалов • операторов
- применима для решения широкого класса физических задач



Построение физико-математических теорий

Очевидные истины:

1. Математическая теория становится физико-математической с принятием физических гипотез (аксиом адекватности), обеспечивающих связь математических моделей с реалиями физического мира
2. Аксиомы адекватности должны согласовываться с экспериментальными данными

Примеры формирования физико-математических теорий:

- Математический анализ + гипотезы сходимости и непрерывности процессов реального мира
- Теоретическая механика + гипотеза справедливости законов Ньютона
- Теория вероятностей + гипотеза статистической устойчивости физических явлений

ФИЗИЧЕСКИЕ ГИПОТЕЗЫ

Гипотезы теории вероятностей

- **абсолютной статистической устойчивости:**
явления реального мира статистически устойчивы;
- **реальный мир устроен по случайному принципу.**

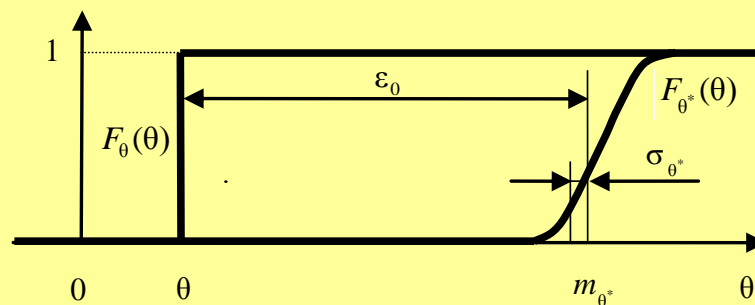
Гипотезы теории гиперслучайных явлений

- **ограниченной статистической устойчивости:**
в реальном мире имеют место нарушения статистической устойчивости;
- **реальный мир устроен по гиперслучайному принципу.**

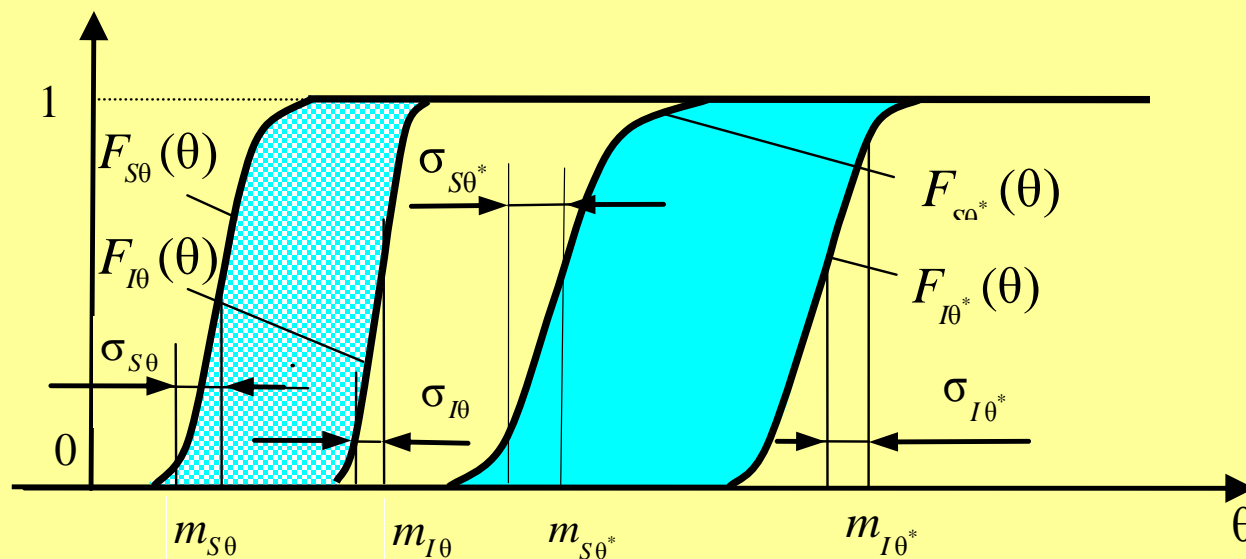
Вывод: Теория гиперслучайных явлений –

- **новая физико-математическая** теория, основанная на **новых физических гипотезах,**
- **решающая шестую проблему Гильберта** в части теории вероятностей

Модели измерения



Классическая детерминированно-случайная модель измерения



Гиперслучайно-гиперслучайная модель измерения

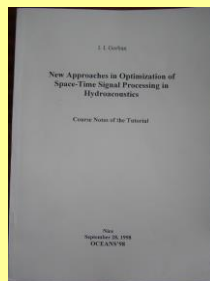
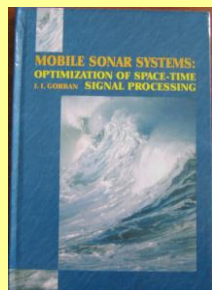
Практические результаты ТГСЯ

- Показано, что погрешность измерений содержит кроме известных систематической и случайных составляющих еще **непредсказуемую** составляющую;
- Объяснено почему **точность** любых измерений ограничена (оценки **несостоятельны**);
- Показано, что для каждой физической величины существует **предельный объем выборки**, превышение которого не приводит к увеличению точности измерений;
- Установлено, что **существуют пределы возможности прогнозирования** и они определяются **величиной интервала статистической устойчивости**

Основные результаты

№ п/п	Теории	Внедрение
1	Теория пространственно-временной обработки гидроакустических сигналов в сложных динамических условиях.	ГАС «Кентавр», «Кентавр-СК», «Эверест», «Луч-3», «Звезда». РЛС «МР 244-2М»
2	Теория быстрой многоканальной обработки гидроакустических сигналов.	ГАС «Кентавр», «Кентавр-СК», «Эверест», «Луч-3», «Звезда».
3	Физико - математическая теория гиперслучайных явлений.	

Книги



по гидроакустике

по физико-математической
теории гиперслучайных явлений



по теории вероятностей

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

igor.gorban@yahoo.com

Тел. 099-791-0-781

**Монографии выставлены
на сайте ИПММС**