

# НОВОЕ В АНАЛИЗЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ СЛОЖНОЙ СТРУКТУРЫ

*В.А. Крутиков, В.А. Тартаковский, Н.Н. Чередыко, Ю.В. Волков,  
А.Н. Маркелова, Э.В. Иванова*

**The new in the analysis of geophysical data with complicated structure**

*Vladimir A. Krutikov, Valery A. Tartakovsky, Natalia N. Cheredko, Yuriy V. Volkov,  
Anna N. Markelova, Ella V. Ivanova*

**Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН. Томск**  
Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS\_



- ✓ Возможности моделирования гидрометеорологических процессов ограничены недостатком знаний о системе, отсутствием «убедительной теории и подходящего ей математического аппарата»

(Дымников В.П. Устойчивость и предсказуемость крупномасштабных атмосферных процессов.

- ✓ 2007 для данной точности (сколь угодно большой, но конечной) можно всегда указать такой промежуток времени, что для него невозможно сделать предсказания. И этот промежуток (в этом вся соль) не так уж велик...»

(Феймановские лекции по физике. Т. 3)

- ✓ «...открытие в природе и обществе функциональных связей позволяет предвидеть будущее, осуществлять обоснованный прогноз актуально еще не состоявшихся типичных событий»

(Анисов А.М., Креативность. 2002)

- ✓ «... даже и в том случае, если бы законы природы не представляли собой никакой тайны, мы могли бы знать первоначальное состояние только приближенно. ... Мы говорим, что явление было предвидено, что оно управляется законами. Но дело не всегда обстоит так, иногда небольшая разница в первоначальном состоянии вызывает большое различие в окончательном явлении.»

(Пуанкаре А. О науке. 1990)

- ✓ «... целью анализа многомерных временных рядов систем мониторинга предлагается считать поиск сигналов синхронизации, согласованности вариаций наблюдаемых параметров, относящихся к состоянию изучаемого объекта, измеряемых в пространственно разнесенных пунктах системы мониторинга или измеряемых в одном пункте физически разных величин»

(Любушин А.А. Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. 2007)

## Целесообразно

**целевое** обращение к данным инструментальных измерений с намерением установления **новых** признаков и закономерностей функционирования климатической системы в глобальном и **региональных** масштабах



## ФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

- **Синхронность, или согласованное поведение природно-климатических процессов** – их принципиальное свойство, важнейшее следствие солнечно-земных связей
- Солнце – основной источник и регулятор внешнего вынуждающего воздействия на процессы, протекающие на Земле
- Внешнее вынуждающее воздействие формирует **СХОДСТВО** элементарных процессов, проявляется в некоторой их согласованности, вызванной этим воздействием
- Сходство определяет совпадающие **существенные признаки**, которые требуется установить

## ФОРМАЛИЗАЦИЯ ОПЫТА

- **Общий сигнал** – проявления вынуждающего воздействия в элементарных процессах
- **Согласованность** – совпадение существенных признаков процессов
- Наличие согласованности отдельных составляющих процессов расценивается как **присутствие полезного сигнала**, т.е. проявление вынуждающего воздействия на территории
- Составляющие **с совпадающими существенными признаками** – **Coincident Signs CS**
- Составляющие **с несовпадающими существенными признаками** – **Noncoincident Signs NS**



## ОСНОВНАЯ ЗАДАЧА

**не делая конкретных предположений  
о характере процессов различной природы  
на разных пространственных и временных уровнях,  
выявлять элементы согласованности  
между рядами данных, формирующие устойчивые  
пространственно временные структуры в  
совокупности этих инструментальных данных,  
исследование их свойств и взаимосвязей**



- ❖ **Обнаружение в рядах экспериментальных данных устойчивых пространственно-временных структур**
- ❖ **Выявление пространственно-временных аномалий согласованного поведения природно-климатических процессов. Оценка влияния ландшафтов на степень согласованности атмосферных процессов**
- ❖ **Моделирование согласованности динамики исследуемого процесса с модулирующими внешними вынуждающими факторами**
- ❖ **Выявление районов «дальних корреляционных связей» (teleconnections) в полях элементов климата**
- ❖ **Построение дендрохронологий при анализе рядов характеристик годовых колец деревьев, полученных на территориях с оптимальными условиями роста древесной растительности**



## АЛГОРИТМЫ НА ОСНОВЕ СУЩЕСТВЕННЫХ ПРИЗНАКОВ

*Существенные признаки – знаки коэффициентов Фурье-разложения*

$$x_{k,l}; \quad l \in G; \quad k, \nu \in [0, N-1]$$

$$X_{\nu,l} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_{k,l} e^{-i2\pi\nu k/N}$$

$$M_{\nu} = \Omega_{\nu} \sum_l \text{sign} X_{\nu,l}$$

### СОВМЕСТНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ

$$Y_{\nu,l} = \begin{cases} X_{\nu,l}, & |M_{\nu}| = \Omega_{\nu} \cdot N \\ 0, & |M_{\nu}| < \Omega_{\nu} \cdot N \end{cases}$$

### МАЖОРИРУЮЩАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ

$$Y_{\nu,l} = \begin{cases} X_{\nu,l}, & \text{sign} X_{\nu,l} = \text{sign} M_{\nu} \\ 0, & \text{sign} X_{\nu,l} \neq \text{sign} M_{\nu} \end{cases}$$

### ОБЩИЙ СИГНАЛ

$$y_{k,l} = \sum_{\nu=0}^{N-1} Y_{\nu,l} e^{i2\pi\nu k/N}$$

### КРИТЕРИЙ СОГЛАСОВАННОСТИ

$$C(G, l) = \frac{1}{(b-a)N} \sum_{\nu=a}^b h \left( \text{sign} Y_{l,\nu} \times \Omega_{\nu} \sum_l \text{sign} Y_{l,\nu} \right)$$

**ПОПАРНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ  $\Rightarrow$  CS-, NS-СОСТАВЛЯЮЩИЕ  
МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ СТРУКТУР (МВС)**

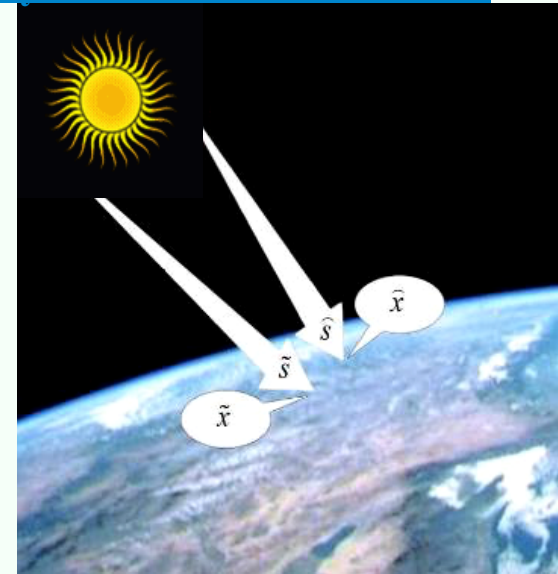
## СОЛНЦЕ - ГЛОБАЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК И РЕГУЛЯТОР ВЫНУЖДАЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

**CS-, NS-СОСТАВЛЯЮЩИЕ => индикаторы перераспределения вынуждающего воздействия**

$$H_{v,l} = \begin{cases} 1, & \text{sign} S_v = \text{sign} X_{v,l} \\ 0, & \text{sign} S_v \neq \text{sign} X_{v,l} \end{cases}$$

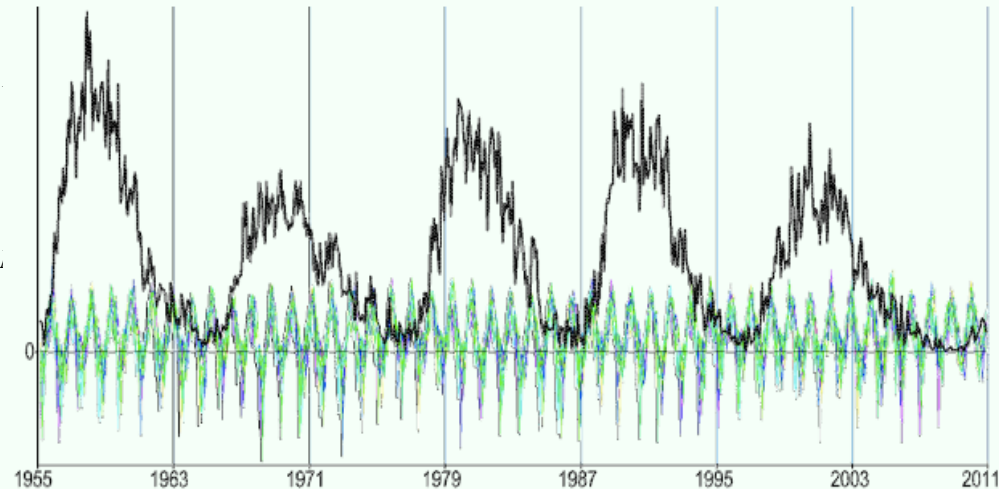
$$S_{v,l} = \begin{cases} S_v, & H_{v,l} = 1 \\ 0, & H_{v,l} = 0 \end{cases}, \quad S_{k,l} = \sum_{v=0}^{N-1} S_{v,l} e^{-i2\pi\nu k/N}$$

$$S_{v,l}^{\%} = \begin{cases} 0, & H_{v,l} = 1 \\ S_v, & H_{v,l} = 0 \end{cases}, \quad S_{k,l}^{\%} = \sum_{v=0}^{N-1} S_{v,l}^{\%} e^{-i2\pi\nu k/N}$$



$$X_{v,l} = \begin{cases} X_{v,l}, & H_{v,l} = 1 \\ 0, & H_{v,l} = 0 \end{cases}, \quad X_{k,l} = \sum_{v=0}^{N-1} X_{v,l} e^{i2\pi\nu k/l}$$

$$X_{v,l}^{\%} = \begin{cases} 0, & H_{v,l} = 1 \\ X_{v,l}, & H_{v,l} = 0 \end{cases}, \quad X_{k,l}^{\%} = \sum_{v=0}^{N-1} X_{v,l}^{\%} e^{i2\pi\nu k/l}$$

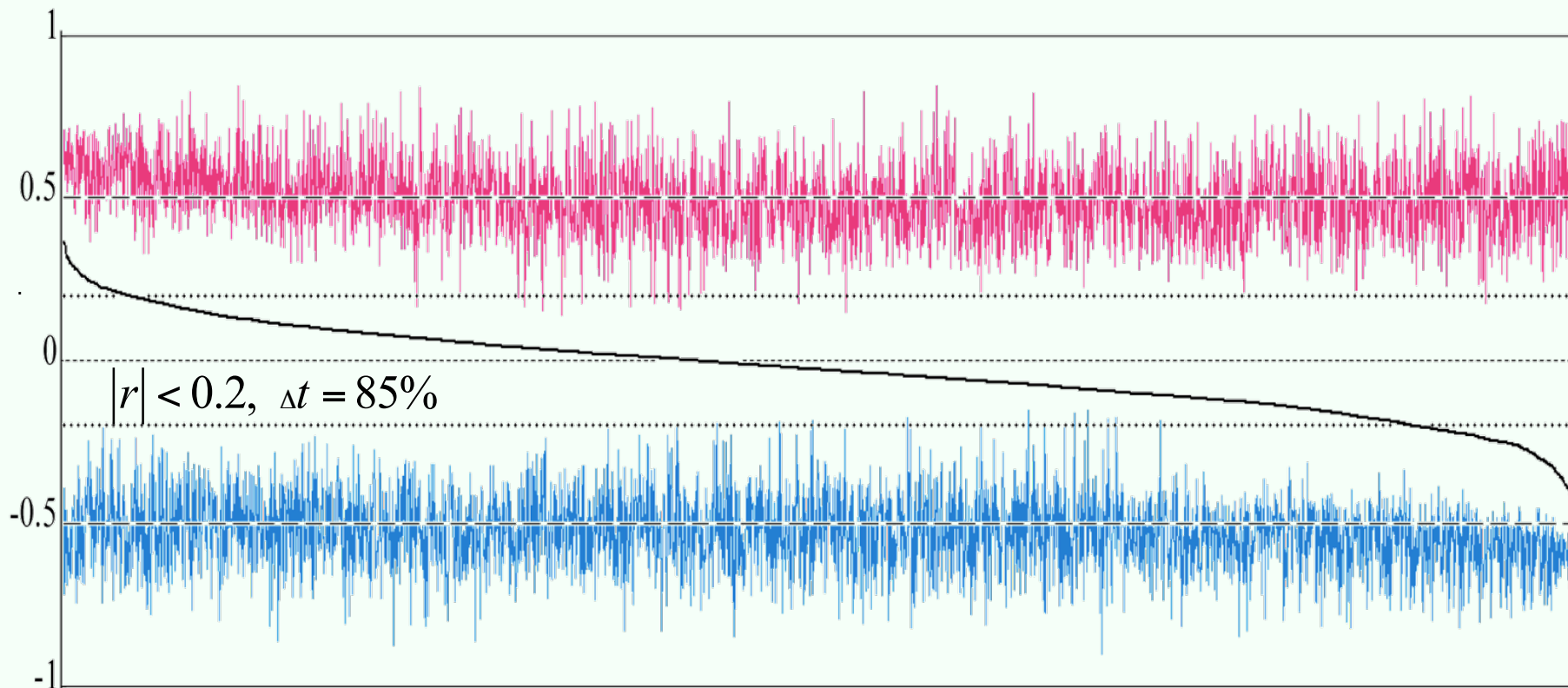


## СОЛНЦЕ - ГЛОБАЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК И РЕГУЛЯТОР ВЫНУЖДАЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

### СВЯЗЬ ТЕМПЕРАТУРЫ И ЧИСЕЛ ВОЛЬФА, CS И NS-СОСТАВЛЯЮЩИХ

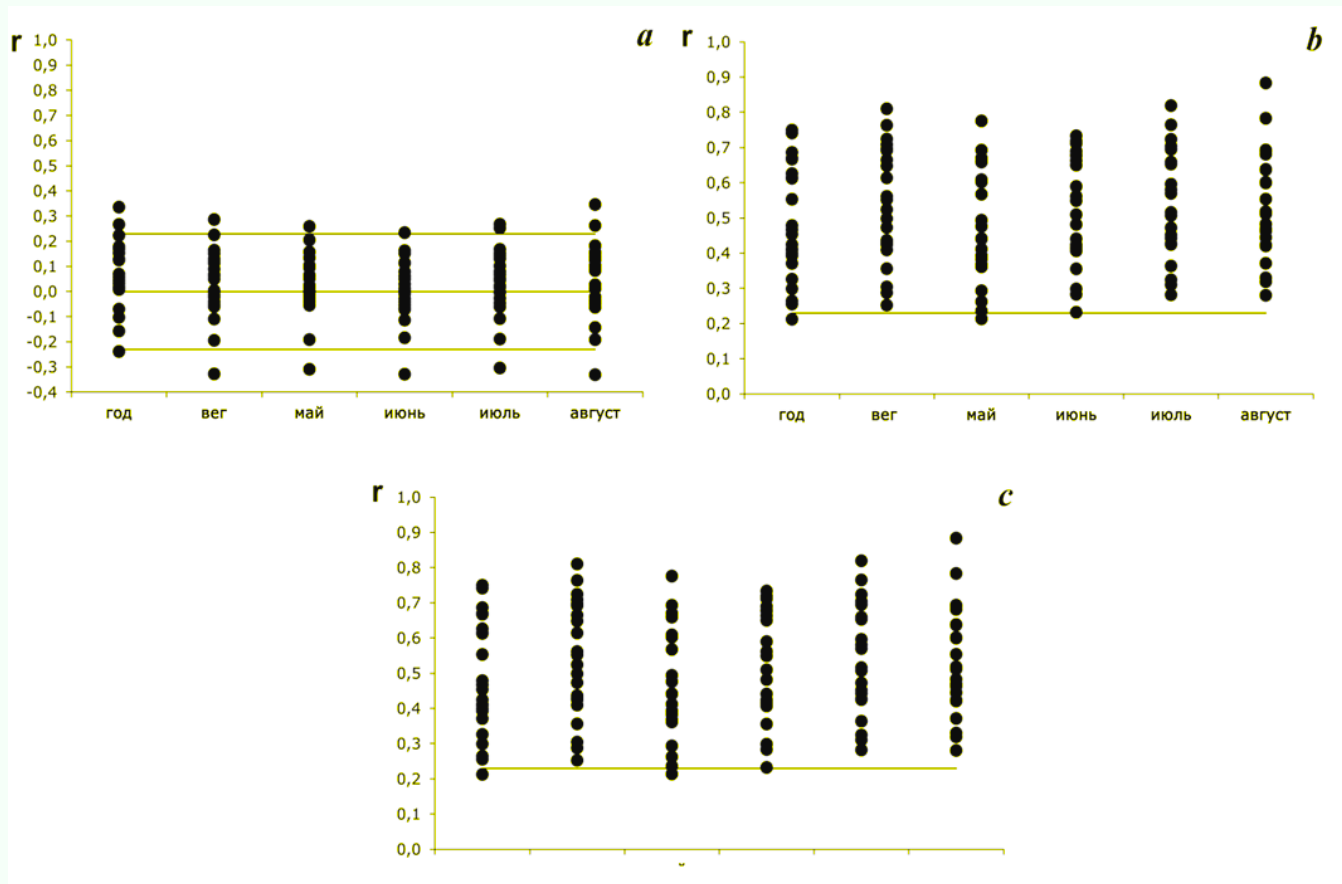
$$r = \text{corr}(s_k, x_{k,l}) = r_l \cdot \left( \frac{Ds_{k,l} \cdot Dx_{k,l}}{Ds_k \cdot Dx_{k,l}} \right)^{1/2} + \rho_l \left( \frac{Ds_{k,l} \cdot D\rho_{k,l}}{Ds_k \cdot Dx_{k,l}} \right)^{1/2}$$

$$\rho_l < 0: r_l > 0 \Rightarrow r_l > r, r_l < 0 \Rightarrow |\rho_l| > |r_l|$$



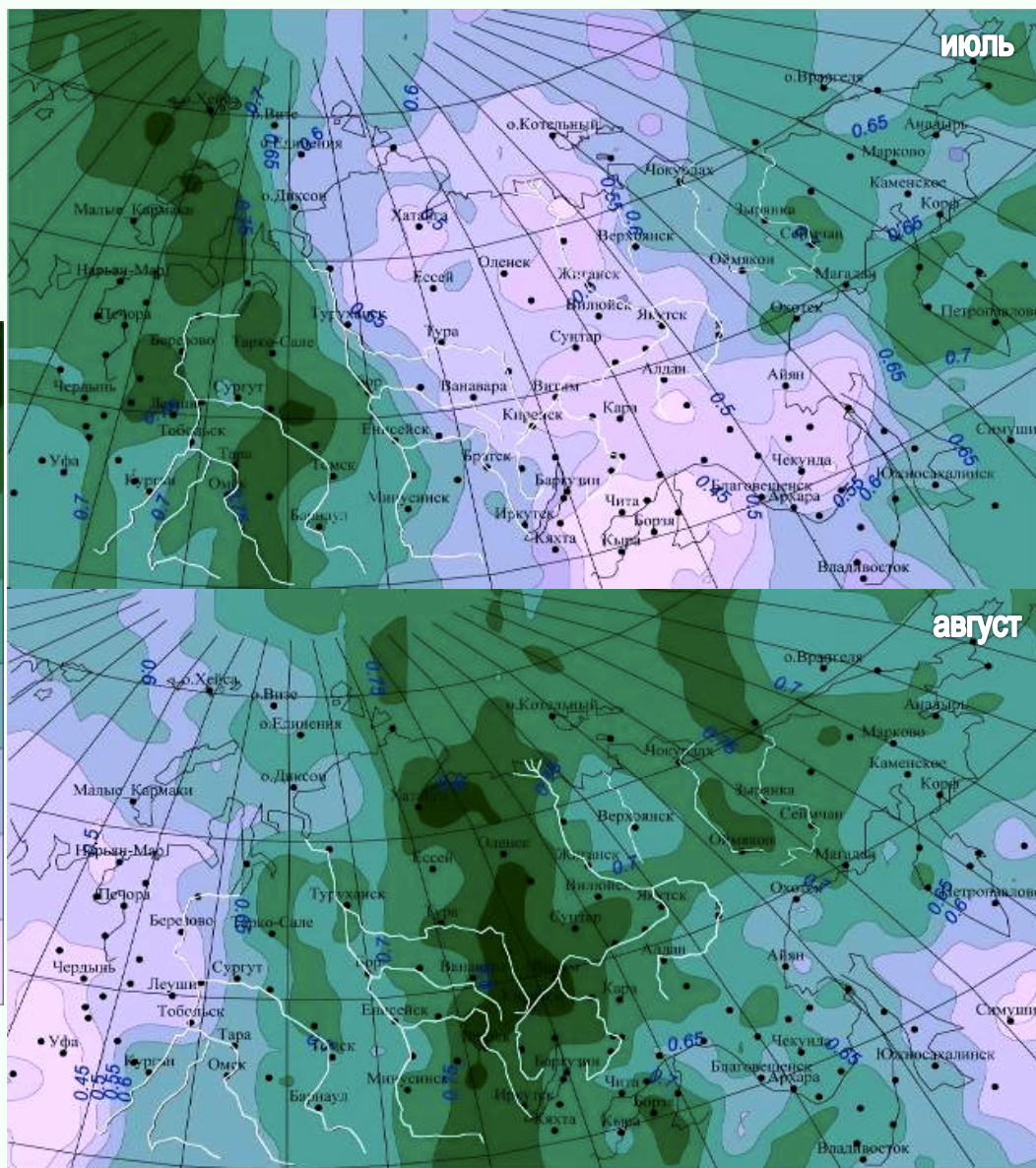


## СВЯЗЬ ДЕНДРОХРОНОЛОГИЙ И ЧИСЕЛ ВОЛЬФА, CS И NS-СОСТАВЛЯЮЩИХ



### Коэффициенты корреляции

- (a) между дендро-хронологиями и числами Вольфа,
- (b) между их составляющими с совпадающими существенными признаками
- (c) между их составляющими с несовпадающими существенными признаками



## *Синхронность поля температуры*

**Выявление пространственных аномалий согласованного поведения природно-климатических процессов в полях их характеристик**  
*Оценка влияния ландшафтов на степень согласованности*

*Азиатская территория России  
 134 метеостанции  
 1955-1998 гг.*

## КЛИМАТИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ

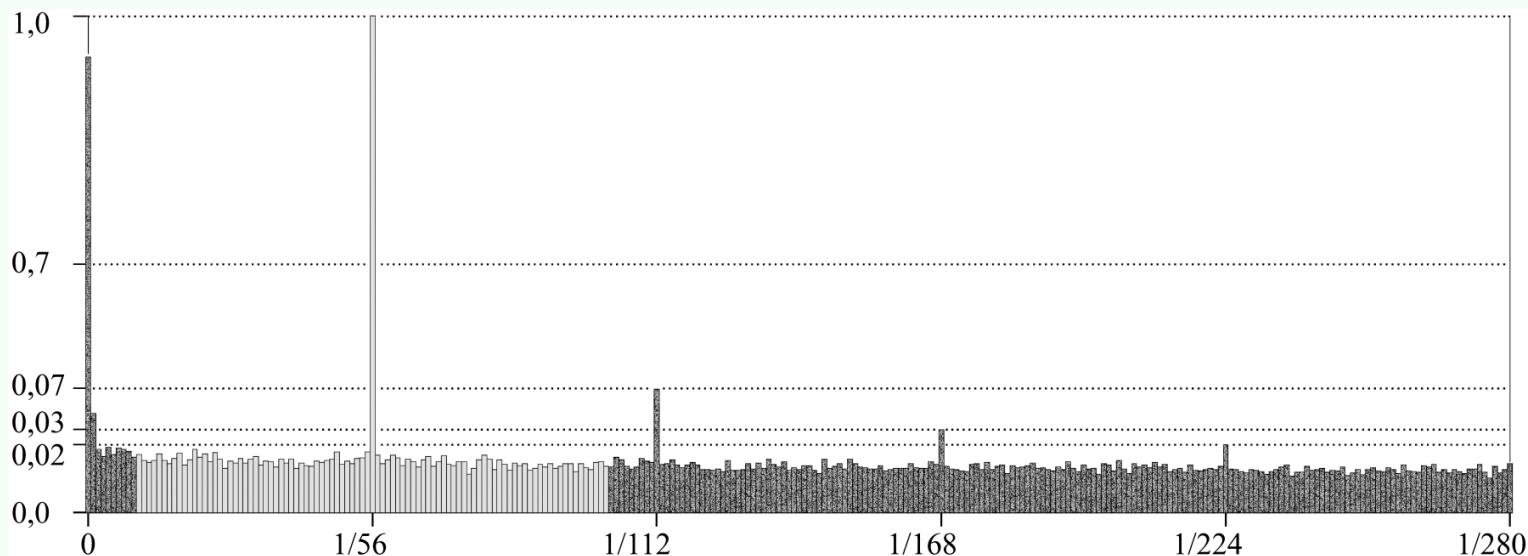
### Алгоритм на основе АНАЛИТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

Аналитический сигнал

$$W(x) = U(x) + iV(x)$$

$$U(\tau) \rightarrow V(\tau) = \mathcal{H}U = p.v. \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{U(x)}{x-\tau} dx$$

$$\left. \begin{aligned} a(\tau) &= \sqrt{U^2 + V^2} \\ \varphi(\tau) &= \arctg[V(\tau)/U(\tau)] \end{aligned} \right\} \rightarrow U(\tau) = a(\tau) \cos \varphi(\tau)$$

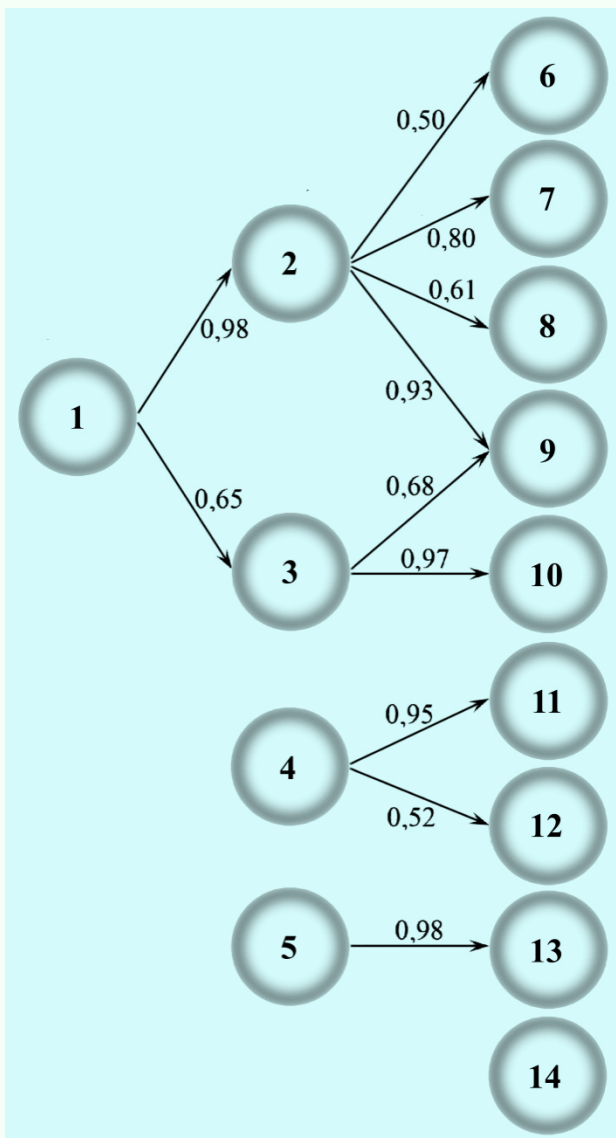


Нормированный спектр мощности 332 температурных рядов по оси ординат в степенном масштабе с показателем 1/2.

Представлены начальные 280 отсчетов из 2048. Светлым тоном выделен интервал, используемый для вычисления фазы.

По оси абсцисс, на частотах, кратных 1/56 доли интервала наблюдений, различимы пять мод, связанных с фазовой модуляцией.

## КЛИМАТИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ



Генетическая связь климатических классов при различных порогах корреляции  $r$ , ряды слева-направо:

первый ряд,  $r = 0,4$  – класс №1;

второй ряд,  $r = 0,6$  – классы от №2 до №5;

третий ряд,  $r = 0,8$  – классы от №6 до №14.

*На стрелках указаны коэффициенты корреляции между типовыми фазами соответствующих классов*

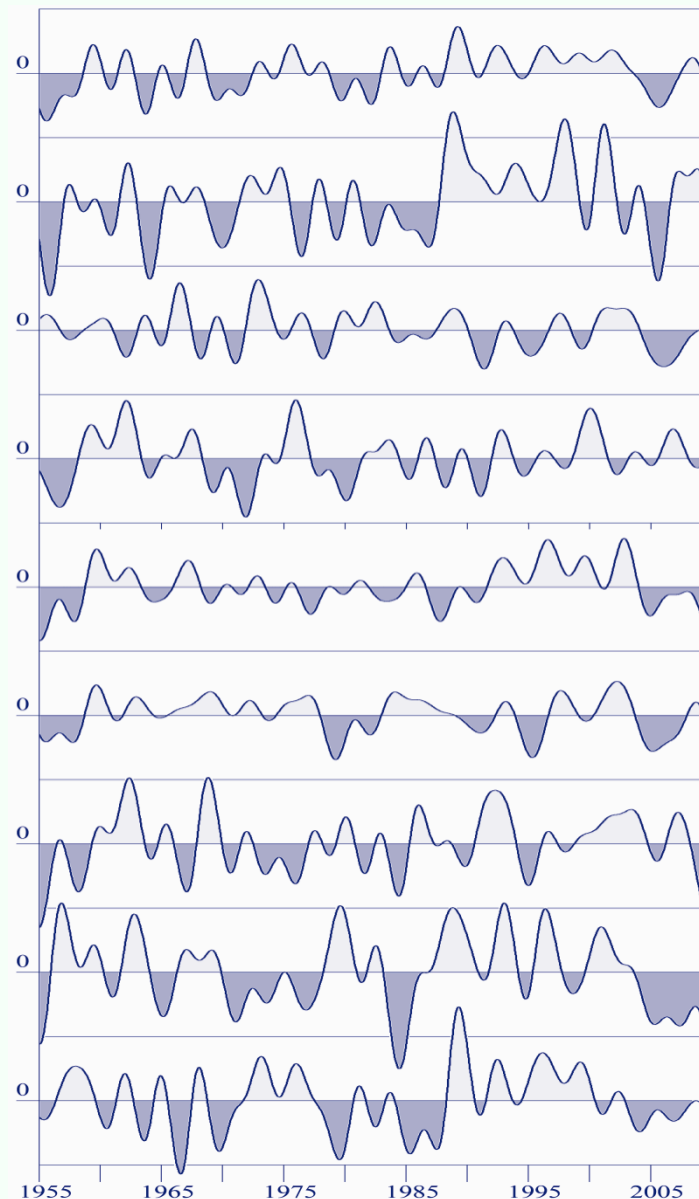
## КЛИМАТИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ

Типовые фазы расположены сверху вниз,  
 соответствуют девяти выделенным климатическим  
 классам при  $r = 0,8$ .

Горизонтальные линии проведены с шагом 0,1 рад.

*Светлым тоном обозначена положительная часть  
 колебания, темным – отрицательная*

## **ТИПОВЫЕ ФАЗЫ**



## КЛИМАТИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ

### Пространственное распределение климатических классов

в среднем за период с 1955-2010 гг.

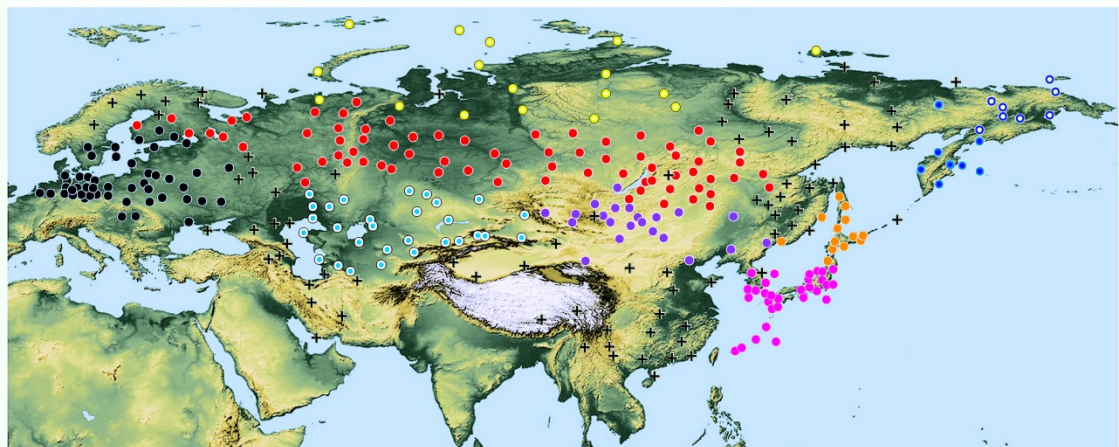
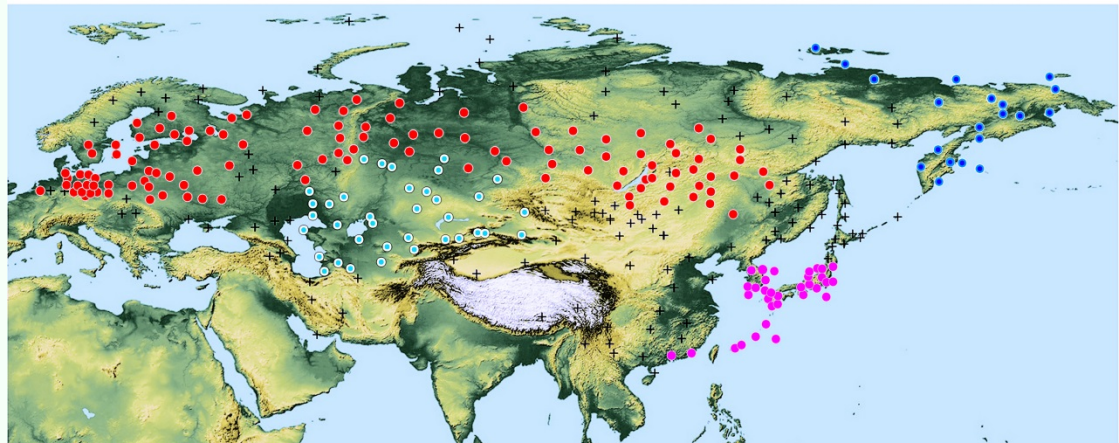
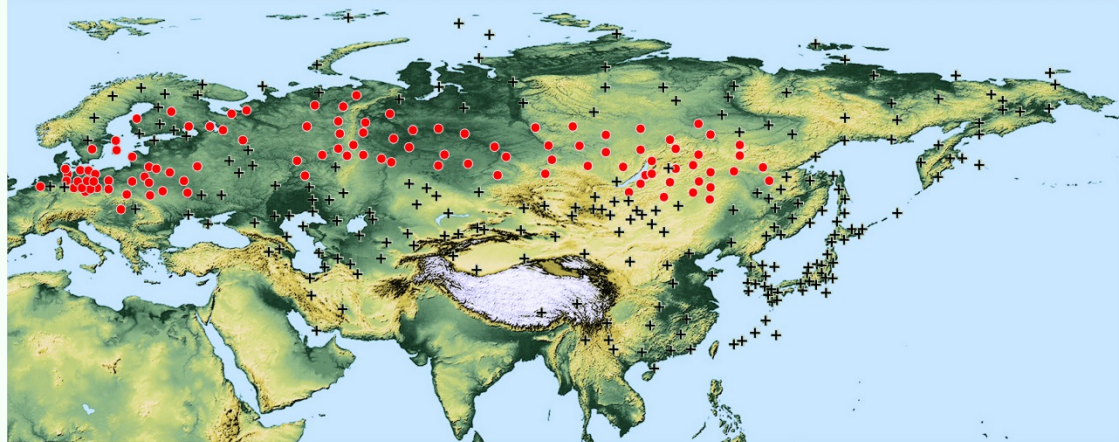
Значения порогового коэффициента корреляции  $r$  фаз внутри класса, сверху вниз:

*a* – 0,4

*b* – 0,6

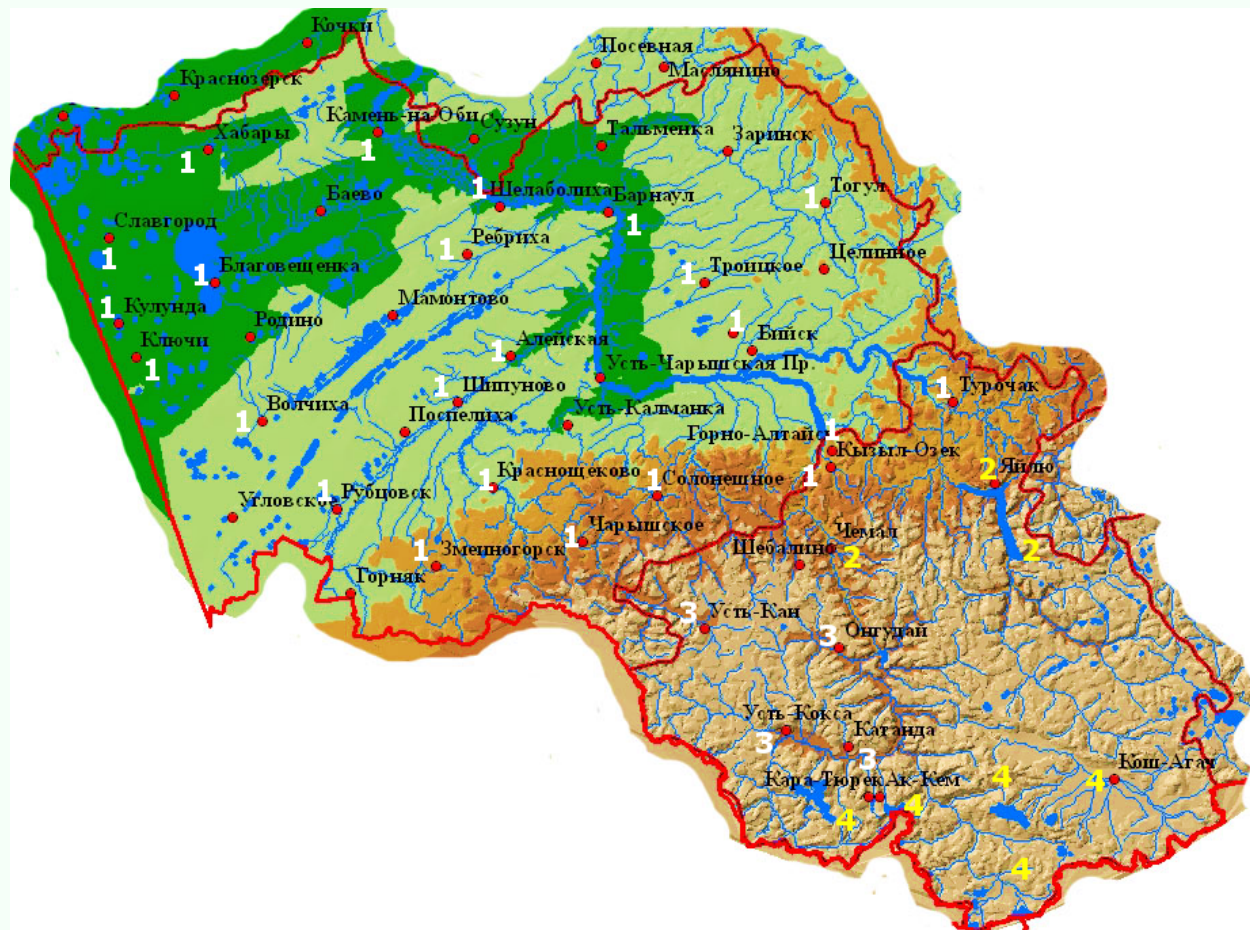
*в* – 0,8

Станции, входящие в класс, обозначены маркерами одного цвета, не входящие - обозначены знаком « + ».



## КЛИМАТИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ

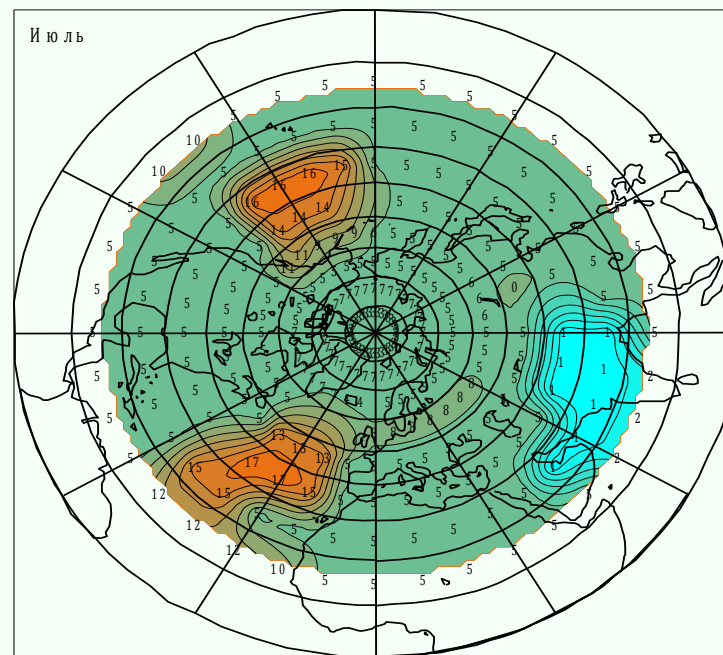
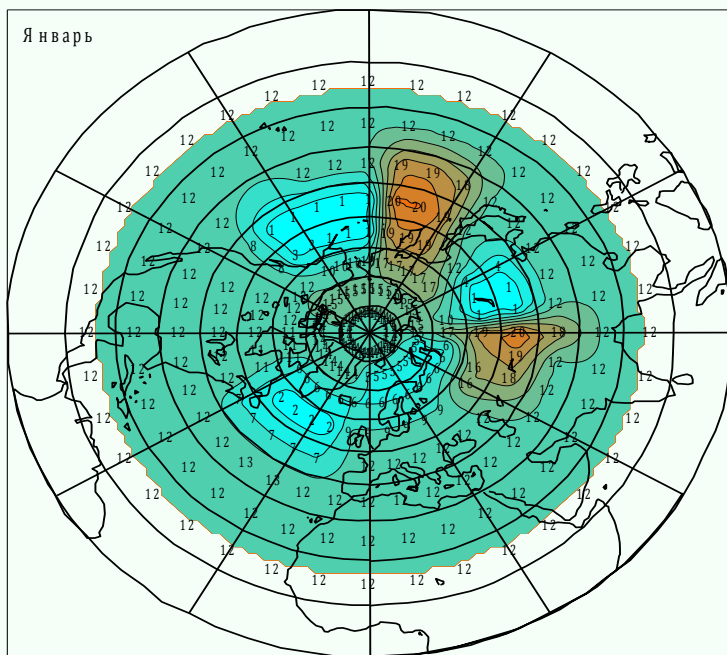
Распределение классов приземной температуры воздуха по территории Алтайского региона



класс	число станций	средняя температура, °С	дисперсия, °С <sup>2</sup>	средний коэффициент корреляции	внутриклассовое расстояние, °С	межклассовое расстояние, °С		
						2	3	4
1	21	2.5	172	0.99	0.17	0.32	0.25	0.77
2	3	4.0	106	0.99	0.20		0.43	0.88
3	4	0.0	164	0.99	0.20			0.52
4	5	-4.1	153	0.97	0.36			

## КЛИМАТИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ

### в поле среднего месячного приземного давления в Северном полушарии



Распределение классов поля давления над Северным полушарием в январе и в июле.

В качестве исходных данных были использованы среднемесячные значения давлений в узлах сетки с шагом 10 градусов по широте и по долготе (288 точек) за период 1955 – 2000 годы на территории Северного полушария.



## Районы дальних корреляционных связей

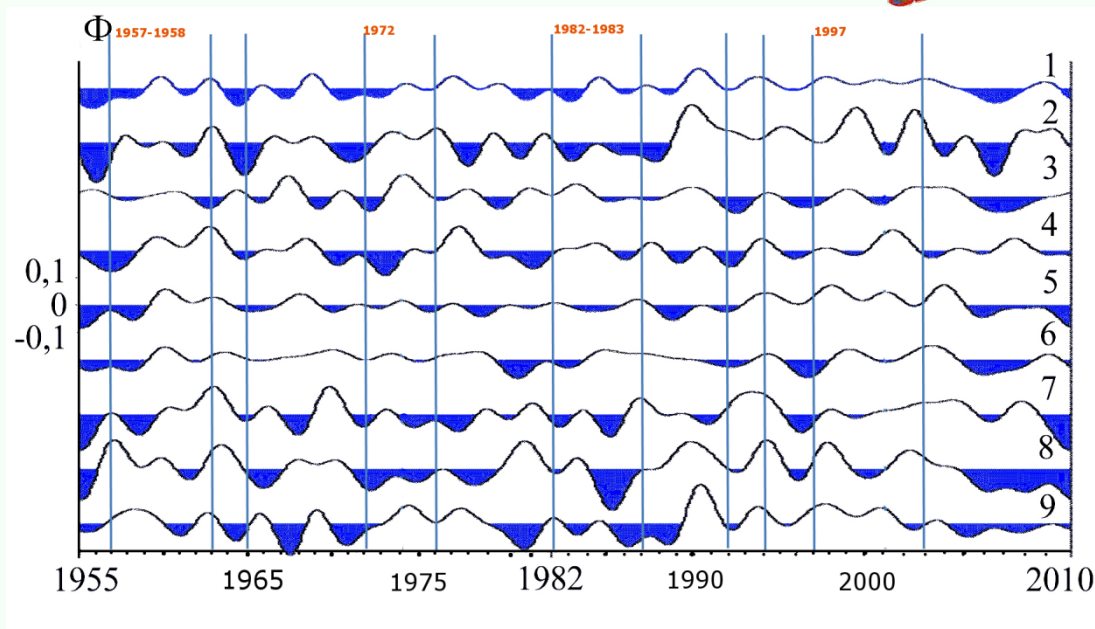
наиболее сухие, в порядке убывания охваченной территории, годы:

1997, 1962, 1974, 2009, 1965, 2011, 1967

Ранжир влажных лет: 2009, 2002, 1972, 1984, 1987, 1993, 2000, 2013



- ✓ резкое уменьшение количества осадков на большинстве станций Алтайского региона наблюдаются в периоды очень сильных Эль-Ниньо
- ✓ В то же время, для другой половины станций самые сухие годы за весь исследованный период приходятся на годы с устойчивой отрицательной аномалией в Тихом океане – событие Ла-Нинья
- ✓ Влажные годы и самые влажные годы в регионе, также, соответствуют периодам Эль-Ниньо, но слабо выраженным.



Развитие систем мониторинга природных процессов, совершенствование средств регистрации данных и быстрого доступа к ним



- ❖ Большие объемы данных
- ❖ Физическая разнородность сигналов
- ❖ Неопределенность в начальных данных
- ❖ Неопределенность в источниках возмущений
- ❖ Учет нелинейных взаимодействий разномасштабных факторов
- ❖ Высокая размерность



## ***РАЗРАБОТАННЫЕ АЛГОРИТМЫ***

**ПОЗВОЛЯЮТ АНАЛИЗИРОВАТЬ БОЛЬШИЕ ОБЪЕМЫ РАЗНОРОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ И НАХОДИТЬ В НИХ ПОЛЕЗНЫЕ (ОБЩИЕ) СИГНАЛЫ НА ФОНЕ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ ИССЛЕДУЕМЫХ ПРОЦЕССОВ В ОТДЕЛЬНЫХ ПУНКТАХ НАБЛЮДЕНИЙ, РАСШИРЯЯ ИНФОРМАЦИЮ О ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЕ РЯДОВ ДАННЫХ И ФАКТОРАХ, ИХ ФОРМИРУЮЩИХ, СНИЖАЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В ВОПРОСАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

БЛАГОДА  
РЮ!



*Be happy* 😊

