

Методы изучения динамики радиального прироста деревьев.

1. Методы датирования годичных колец:

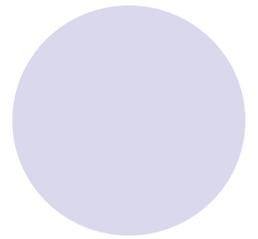
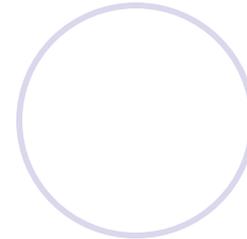
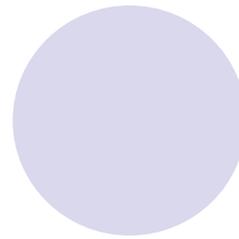
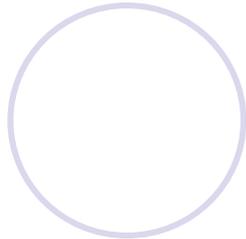
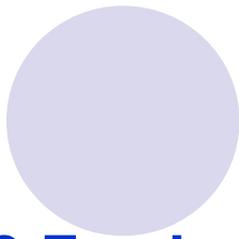
- а) визуальный**
- б) построение скелетных графиков**
- в) построение полулогарифмических диаграмм**

2. Стандартизация данных измерений ширины годичных колец

2.1 Расчёт средних величин

2.2 Методы нахождения «нормы прироста» в зависимости от возраста

2.2.1 Математические методы



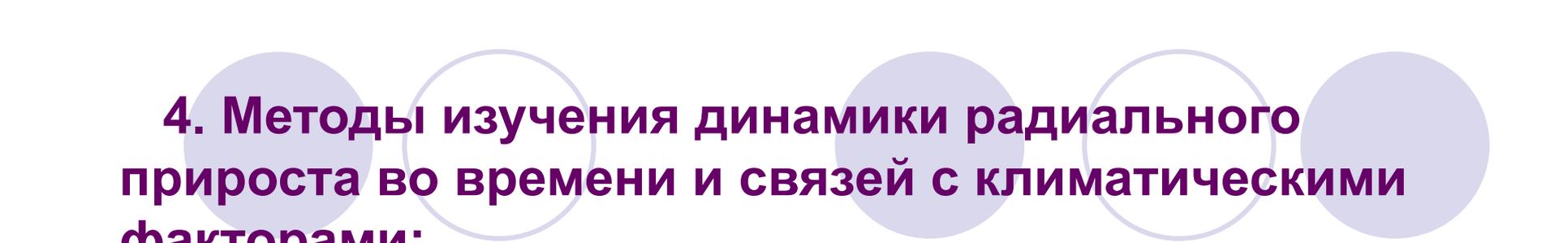
2.2.2 Графические методы

- а) метод стандартных прямых линий (метод Дугласа)**
- б) графическое выравнивание для разновозрастных древостоев (метод Комина)**
- в) построение кривых максимально возможного прироста (метод Шиятова)**
- г) построение кривых средней нормы прироста (метод Оленина)**

2.3 Расчёт относительных индексов

3. Другие методы обработки данных измерений ширины годичных колец:

- а) метод интегрально-разностных кривых**
- б) метод «фазового портрета»**
- в) определение объёмного прироста**



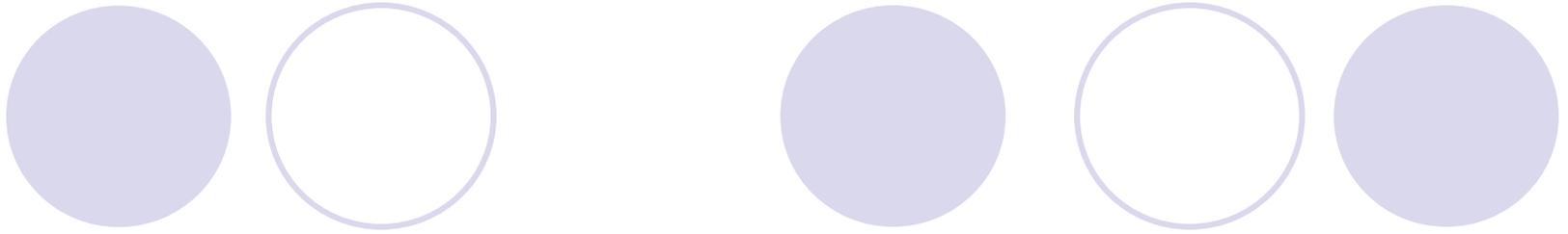
4. Методы изучения динамики радиального прироста во времени и связей с климатическими факторами:

а) визуальный анализ рядов

б) метод наложенных эпох

в) гармонический анализ и анализ спектральной плотности рядов

г) статистические методы анализа (корреляционный анализ, регрессия признаков)



Методы датирования годичных колец

Датирование (датировка) колец:

точное определение года формирования каждого слоя прироста на основе взаимного сопоставления и согласованности в изменении ширины годичных колец.

Для датировки колец применяют различные методы.

Визуальный (осмотр изменчивости колец под увеличительным прибором) (Шиятов, 1973).

Выявляют образцы, у которых имеются ложные и выпадающие кольца и определяют их местоположение.

Кольцо каждого десятилетия (1990, 1980, 1970 и т.д.) маркируется одной точкой, каждого пятидесятилетия (1850, 1950) - двумя, каждого столетия (1800, 1900, 2000) - тремя.

Если известен год формирования внешнего кольца, то датировка остальных колец производится при помощи обратного отсчета.

Когда визуальная датировка затруднена или год формирования внешнего кольца не известен строят и сопоставляют графики изменения ширины годовых колец.

Построение скелетных графиков (skeleton plot) (Douglass, 1936; Glock, 1937; Schweingruber и др., 1990).

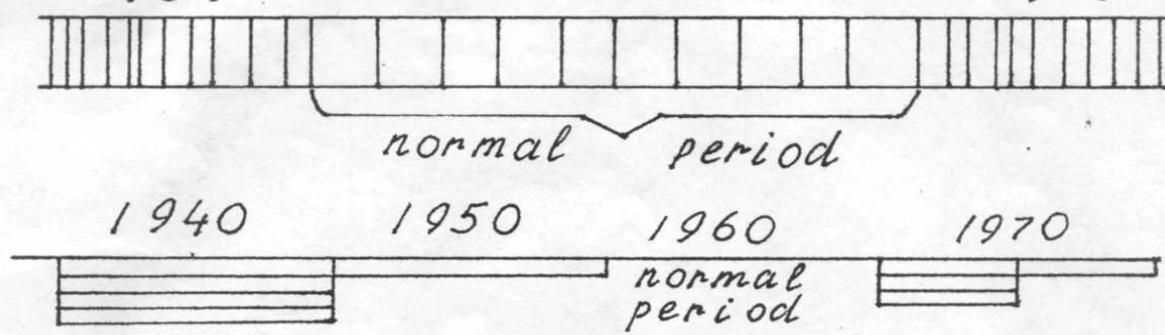
Период, со средней (относительно других) шириной годовых колец, принимается за "нормальный период" (normal period).

Верх или вниз от линии "нормы" откладываются более широкие или более узкие кольца.

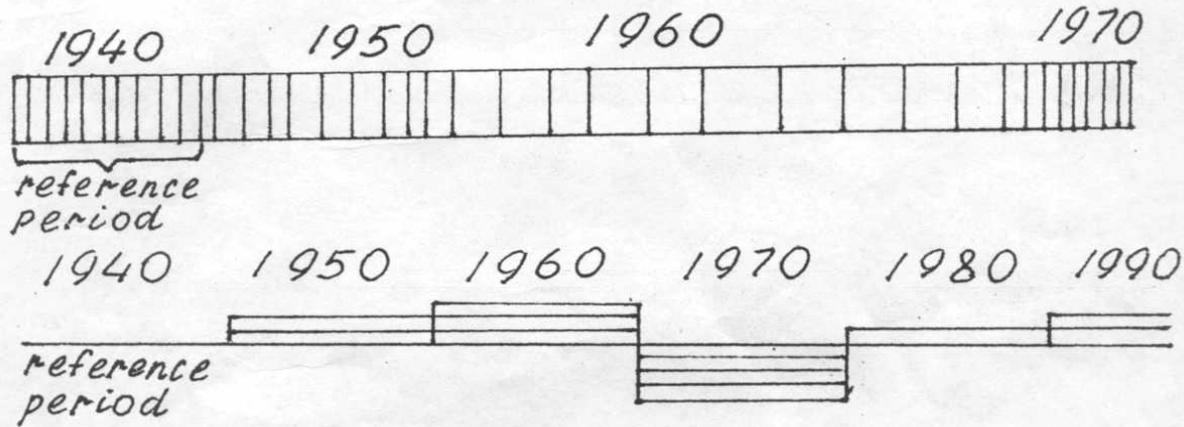
За эталонный период (reference period) можно взять начало образца (первые годовые кольца). На фоне повышенного или пониженного (относительно нормы) периода роста, вертикальными линиями выделяют наиболее узкие или наиболее широкие кольца.

Скелетные графики могут нести различное количество информации.

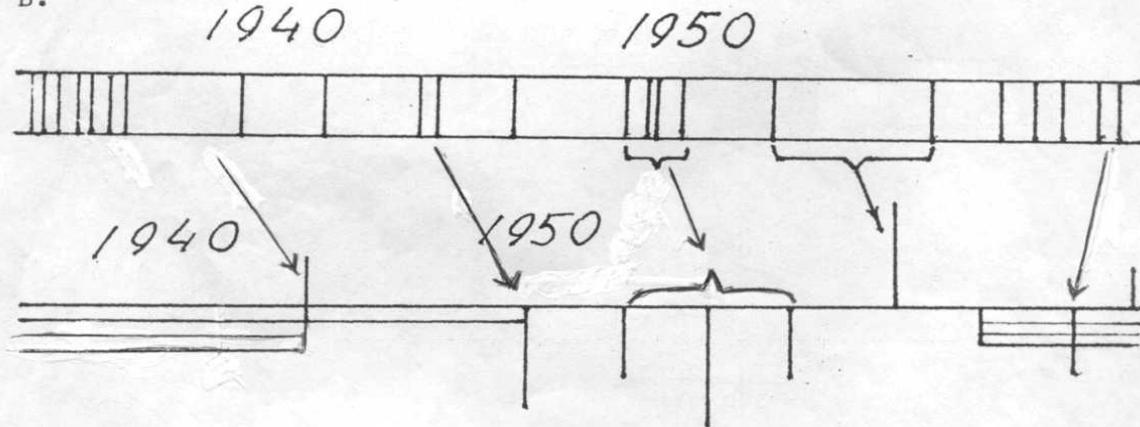
При построении скелетных графиков ширина годовых колец не измеряется.



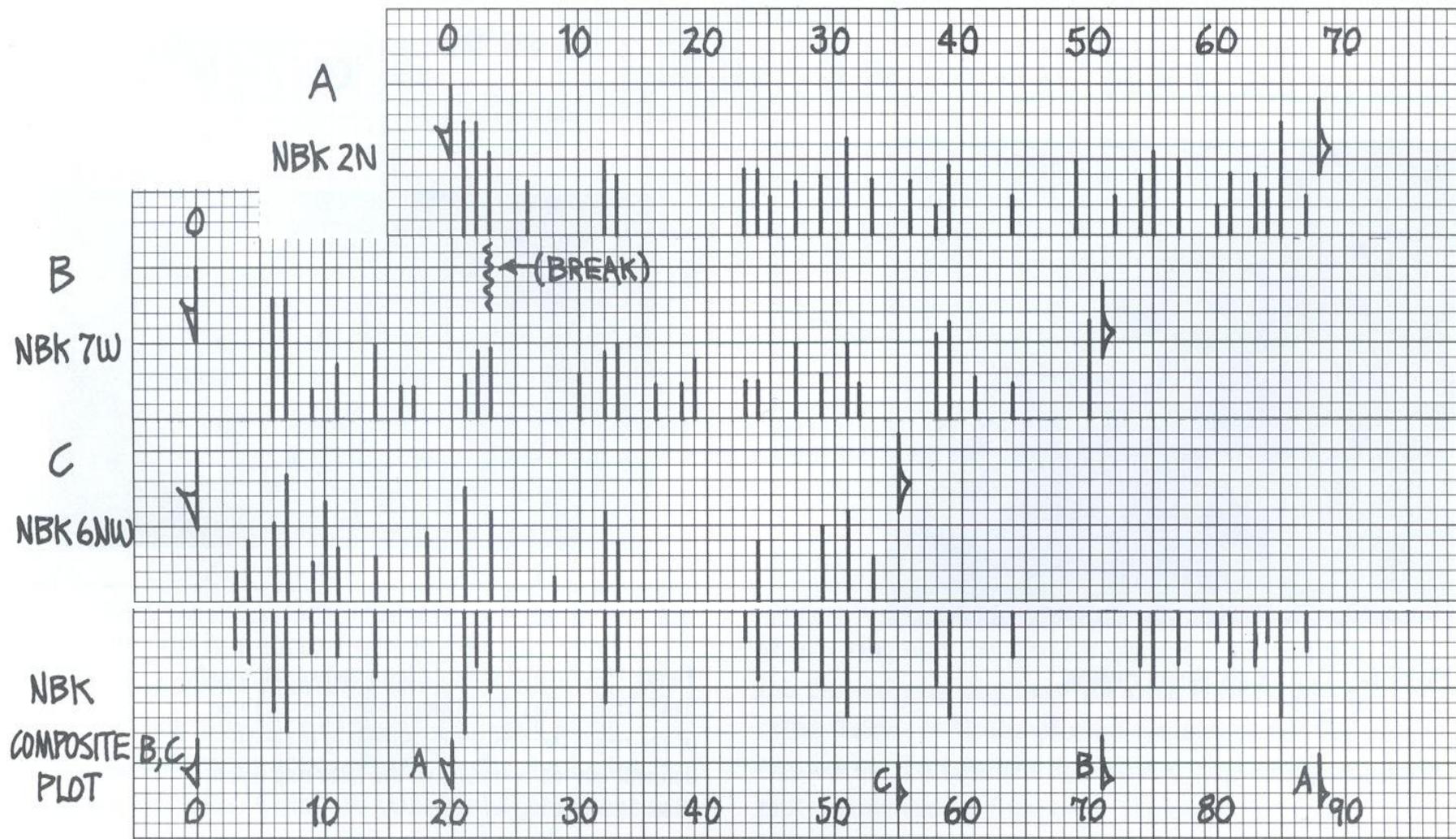
6.



B.



- На рисунке три скелетных графика для трёх кернов



Построение полулогарифмических диаграмм (Huber, 1943; Колчин, 1962 и др.).

Если уменьшение ширины годовых колец с возрастом выражено сильно, то сопоставлять и датировать такие кольца на графиках построенных по обычной шкале - трудно.

В этих случаях применяют полулогарифмические диаграммы.

Диаграммы строятся так:

По оси абсцисс, в обычной последовательности, откладываются календарные годы, а по оси ординат - логарифмы толщины колец в миллиметрах. К единице логарифмического числа приравнивается 1 мм годового кольца, соответственно, годовые кольца уже 1,0 мм более сильно выделяются, чем широкие.

Сопоставление полулогарифмических графиков проводится по узким "угнетенным" кольцам.

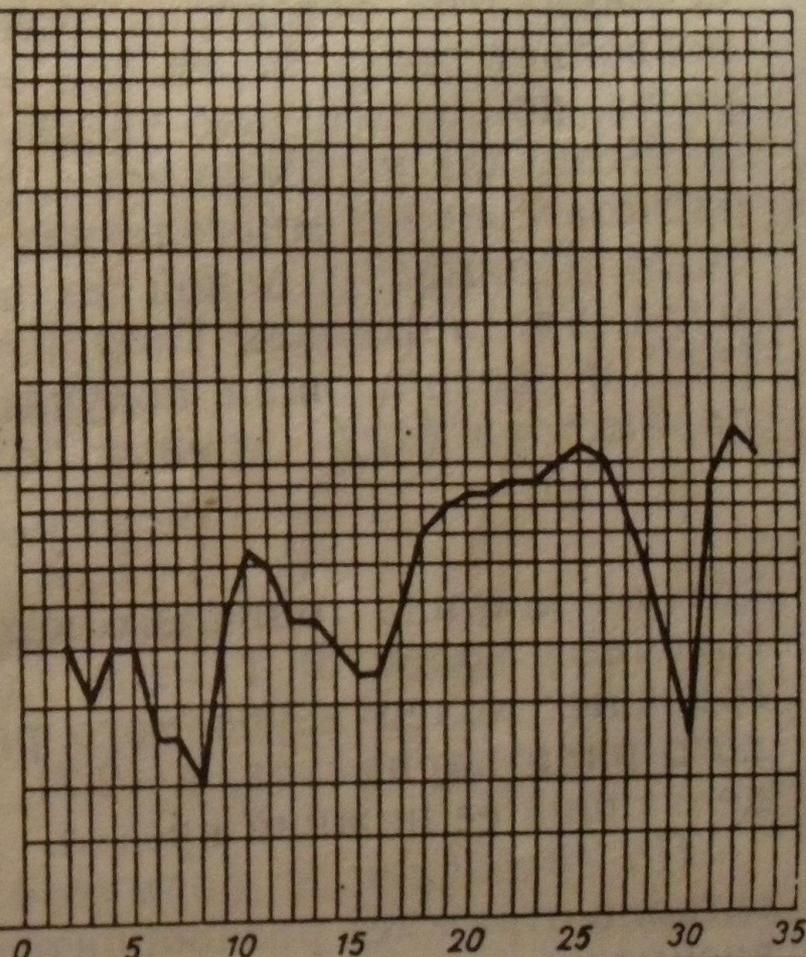
Шкала логарифмов
чисел от 1 до 100

Числа
антилогарифмов

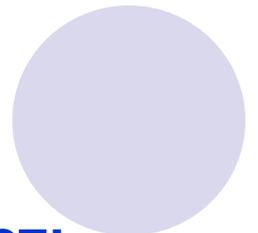
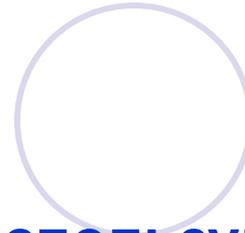
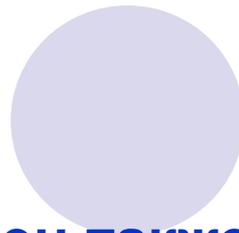
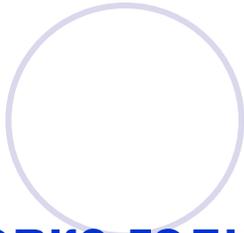
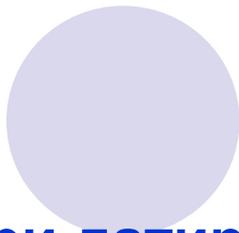
Шкала
арифметическая
цена деления - 10 мм

Шкала чисел
ширины колец
от 0,1 до 10 мм

	10^2	100	10^1	10
20	2,000			10,0
19	1,954			9,0
18	1,903			8,0
17	1,845			7,0
16	1,778			6,0
15	1,698			5,0
14	1,602			4,0
13	1,477			3,0
12	1,301			2,5
11				2,0
10	1,000			1,5
9	0,954			1,0
8	0,903			0,9
7	0,845			0,8
6	0,778			0,7
5	0,698			0,6
4	0,602			0,5
3	0,477			0,4
2	0,301			0,35
1				0,3
0	0,000			0,25
				0,2
				0,15
				0,1



Полулогарифмическая диаграмма и шкалы для ее построения
(Вихров, Колчин, 1962) из книги Т.Т. Битвинскаса (1974)

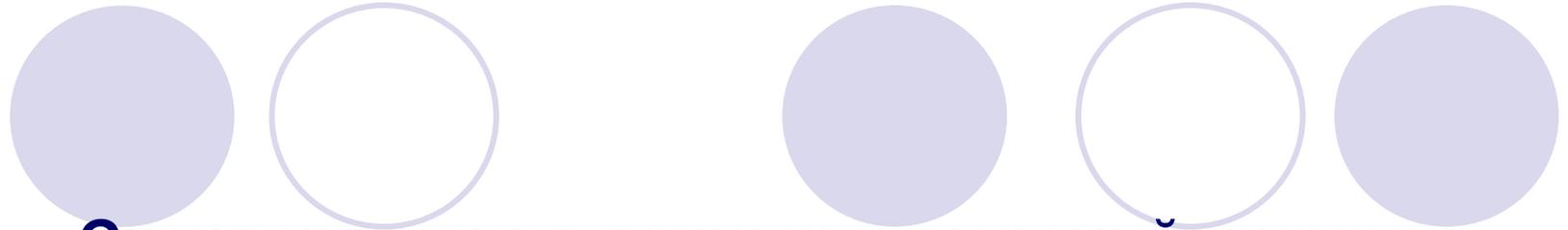


При датировке годовых колец также используют:

- общий характер роста,
- наличие морозобойных и ложных колец,
- процент поздней древесины и др.

Сдатированные годовые кольца измеряют под увеличительным прибором снабженным окуляром с измерительной шкалой:

- измерительная лупа,
- микроскоп-бинокуляр МБС - 1, МБС -2, МБС – 9,
- ЛИНТАБ - (5, 6)
и др. .



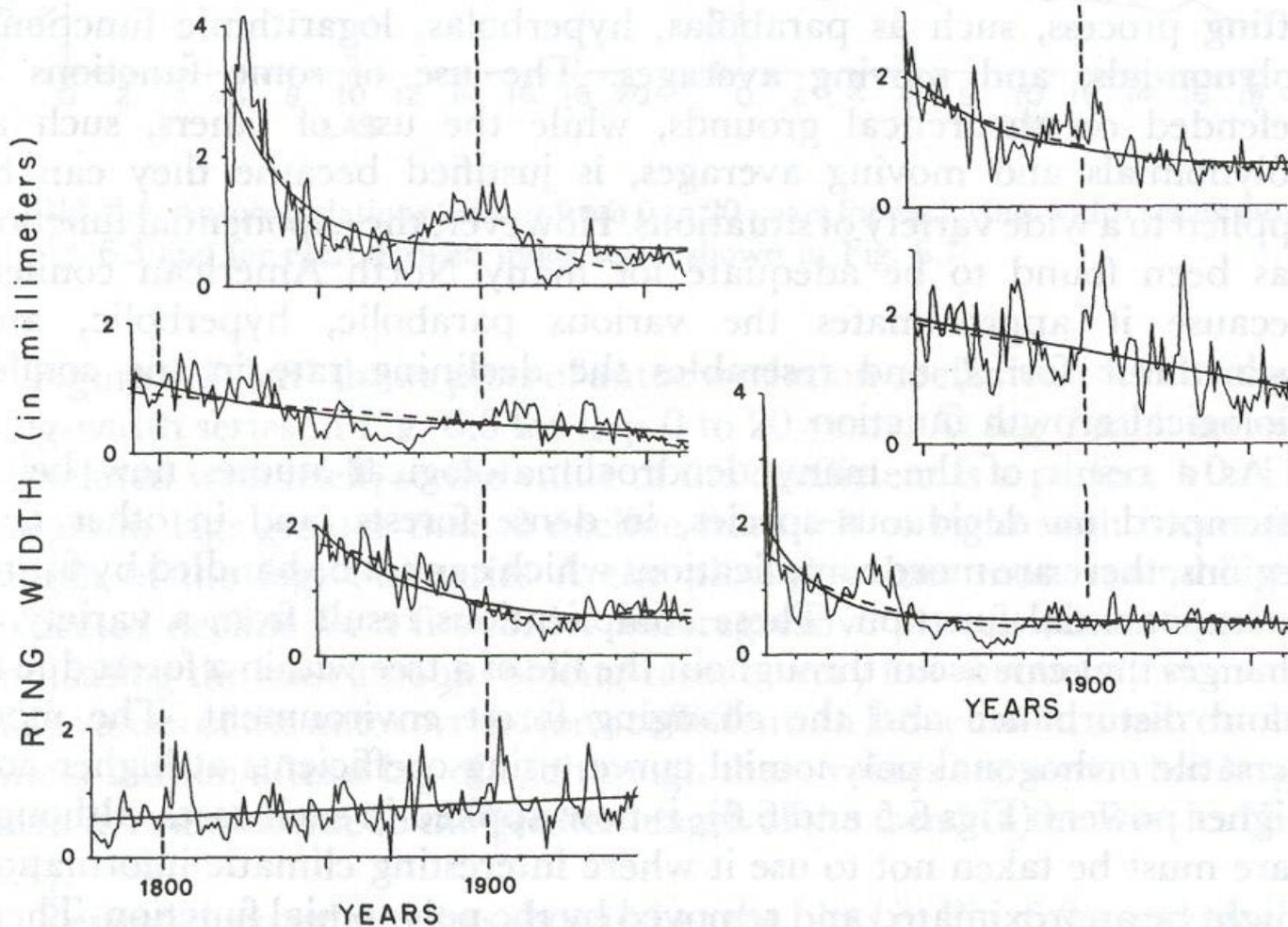
Стандартизация данных измерений ширины годовых колец

Стандартизации значений ширины годовых колец: результаты замеров ширины колец выражают в виде индексов, через отношение каждого замера к установленному значению "нормы прироста" для данного года.

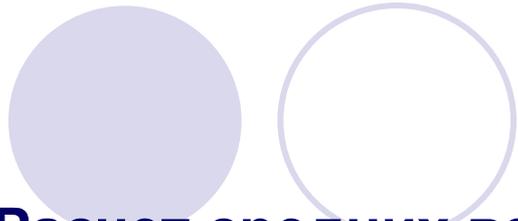
Стандартизация проводится:

- для исключения влияния на изменчивость ширины годовых колец возрастных изменений;
- приведения замеров радиального прироста различных дендрохронологических рядов к сопоставимым величинам.

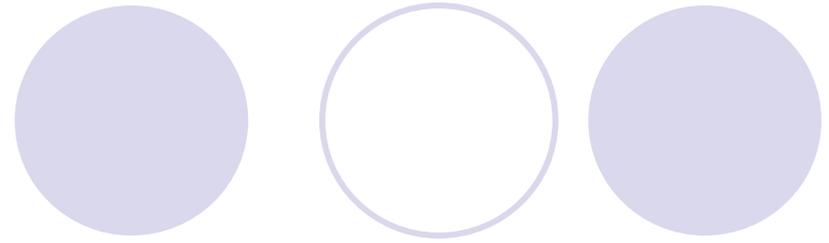
- Standardization



Обратите внимание на различные тенденции в темпах роста между различными деревьями.



Расчет средних величин



Для получения средних величин годовых колец насаждения, данные о ширине (i) всех учетных деревьев (образцов) суммируются по каждому календарному году (j) в отдельности и суммы делятся на число образцов (n):

$$i_{sr} = \sum_{j=1}^n i_j / n \quad (A_n = 1/n \sum a_i)$$

Если в исследуемом насаждении несколько возрастных групп деревьев, средние многолетние кривые радиального прироста для них рассчитывают в отдельности.

Методы нахождения "нормы прироста"

Для нахождения "нормы прироста", т.е. кривой, отражающей изменение темпов роста дерева (или древостоя) с возрастом проводят выравнивание кривых погодичной изменчивости ширины годичных колец.

"Норма прироста", иначе –

- возрастная кривая,
- биокривая,
- биологическая кривая возраста,
- кривая большого роста,
- возрастная линия,
- возрастной тренд,
- среднемноголетняя кривая радиального прироста...

Для выравнивания кривых применяют различные **математические и графические** методы.



Математические методы

Метод наименьших квадратов

Рассчитываются выровненные значения функций (как прямолинейной, так и криволинейной), квадраты отклонения которых от эмпирических значений дают наименьшую сумму.

Уравнение прямой имеет вид:

$$y = a + bx, \text{ где}$$

y - ширина годовичного кольца,

x - календарный год годовичного кольца,

a, b - статистические параметры, вычисляемые для каждого ряда.

Этот способ выявления нормы прироста дает удовлетворительные результаты только для возрастов более 40 - 50 лет, т.к. ширина годовичных колец ближе к сердцевине обычно не подчиняется линейной зависимости.

Шведские дендроклиматологи М. Неслунд (Naslund, 1942) и Б. Эклунд (Eklund, 1957)

предложили методом наименьших квадратов рассчитывать средние многолетние кривые радиального прироста (норму прироста) имеющие вид гиперболы.

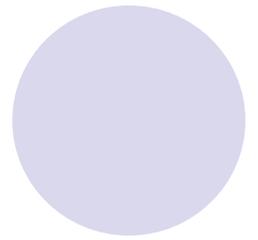
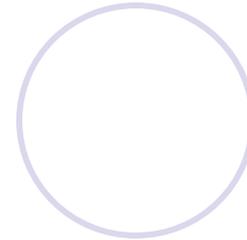
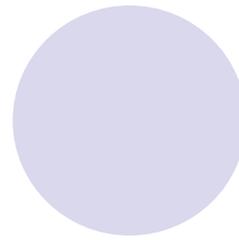
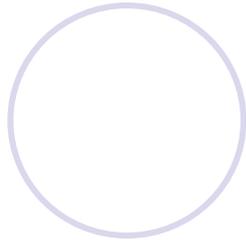
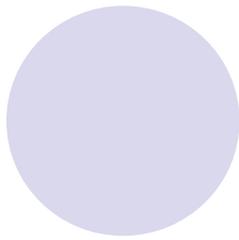
При этом, по Неслунду, годовичные кольца, расположенные в 2 см от сердцевины дерева и ближе, в расчет не включаются. Если ширину годовичного кольца обозначить через y , а число годовичных колец за пределами указанного расстояния от сердцевины через x , статистические параметры - a и b , то функция возрастной биокривой, по

Неслунду, будет иметь вид

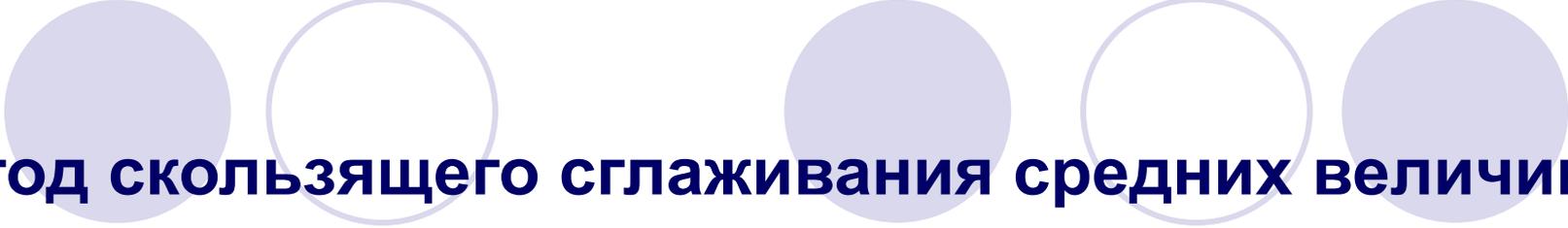
$$y = a + \frac{b}{x}$$

а функция предложенная Эклундом

$$\frac{1}{y} = -a + b$$



Наличие **гиперболической зависимости** радиального прироста насаждений имеет большое значение для дендрохронологических и дендроклиматических исследований, поскольку она может быть использована в качестве шаблона для определения радиального прироста по возрасту (Битвинскас, 1974).

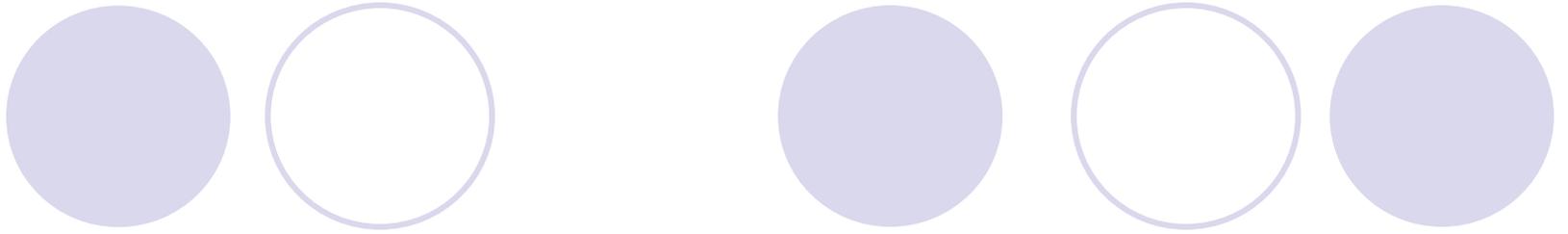


Метод скользящего сглаживания средних величин

Впервые этот метод в дендрохронологии применил С. Андштадт (Andstad, 1938) при изучении годовичных колец сосны и датировке старых строений в Норвегии.

Он использовал скользящие кривые для выявления изменчивости годовичных слоев в зависимости от возраста и для последующего их применения при нормировании рядов годовичных колец относительно меняющейся во времени средней скользящей нормы.

Для этого он использовал 3-, 11- и 31-летнее скользящее сглаживание.



При расчетах скользящих кривых, например с 11-летним сглаживанием годовых колец, сумма толщины годовых колец делится на 11 и является средней нормой 6-го года, входящего в расчет. Далее толщина 1-го годового кольца из суммы 11-ти годовых колец вычитается и добавляется 12-е годовое кольцо, затем вычитается 2-е и добавляется 13-е кольцо, а средняя многолетняя ширина годового кольца относится последовательно к 7-му, 8-му году и т.д.

Метод скользящего сглаживания можно выразить и следующим образом (например, для 5-летнего сглаживания):

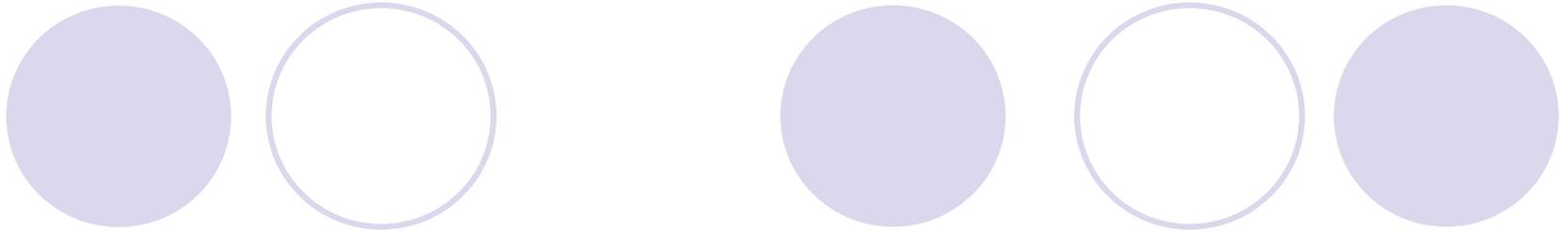
$$c_1 = (a + b + c + d + e) / 5, \text{ где}$$

a, b, c, d, e - последовательно меняющиеся замеры годовых колец;

c_1 - сглаженная ширина годового кольца.

Т. Руден (Ruden, 1945) обратил внимание на так называемый **эффект Слуцкого**, проявляющийся в изменении спектральной плотности исходного ряда в сторону устранения циклов, меньших, чем период сглаживания, и появления временных сдвигов в ходе квазиритмичных процессов.

Эффект Слуцкого (Слуцкий, 1927) - периодичность колебаний становится близкой к длине применённой скользящей (шагу сглаживания).



При расчете биологической возрастной кривой способом скользящего сглаживания ее концы "обрываются" при использовании 3-летних скользящих - за 1 год, 11-летних - за 5 лет, 21-летних - за 10 лет, 31-летних - за 15 лет.

В таких случаях приходится средние многолетние кривые экстраполировать, т.е. продолжать, используя общее направление кривых за последние 10-20 лет, или вычислять крайние точки средней многолетней по меньшему числу годовых колец.

3-х летнее весовое скользящее сглаживание (метод Шульмана)

Э. Шульман (Shulman, 1958) для нахождения "нормы прироста" применял метод 3-летнего весового скользящего сглаживания по следующей формуле:

$$b_1 = (a + 2b + c) / 4 ,$$

b_1 - сглаженная ширина годичного кольца данного года;

a - ширина годичного кольца предыдущего года;

b - ширина годичного кольца данного года;

c - ширина годичного кольца последующего года

Графические методы.

Метод стандартных прямых линий (метод Дугласа)

Метод стандартных линий:

изменчивость ширины годовых колец в зависимости от возраста выражают прямой линией.

В действительности первые 20-30 годовых колец, обычно не укладываются в линейную зависимость.

В тех случаях, когда рассматривается радиальный прирост деревьев возрастом 300 - 2000 лет, нахождение линейных зависимостей оправдано.

Графическое выравнивание для разновозрастных древостоев (Г.Е. Комин, 1970)

Для совокупности деревьев одной породы, но разного возраста, произрастающих в одинаковых условиях среды (типа леса), средний годичный прирост вычисляют не по календарным годам, а по возрасту отложения годичных колец.

Полученные возрастные годичные средние значения приростов наносят на график и выравнивают графически.

За норму прироста деревьев в зависимости от возраста принимают значения выровненной кривой.

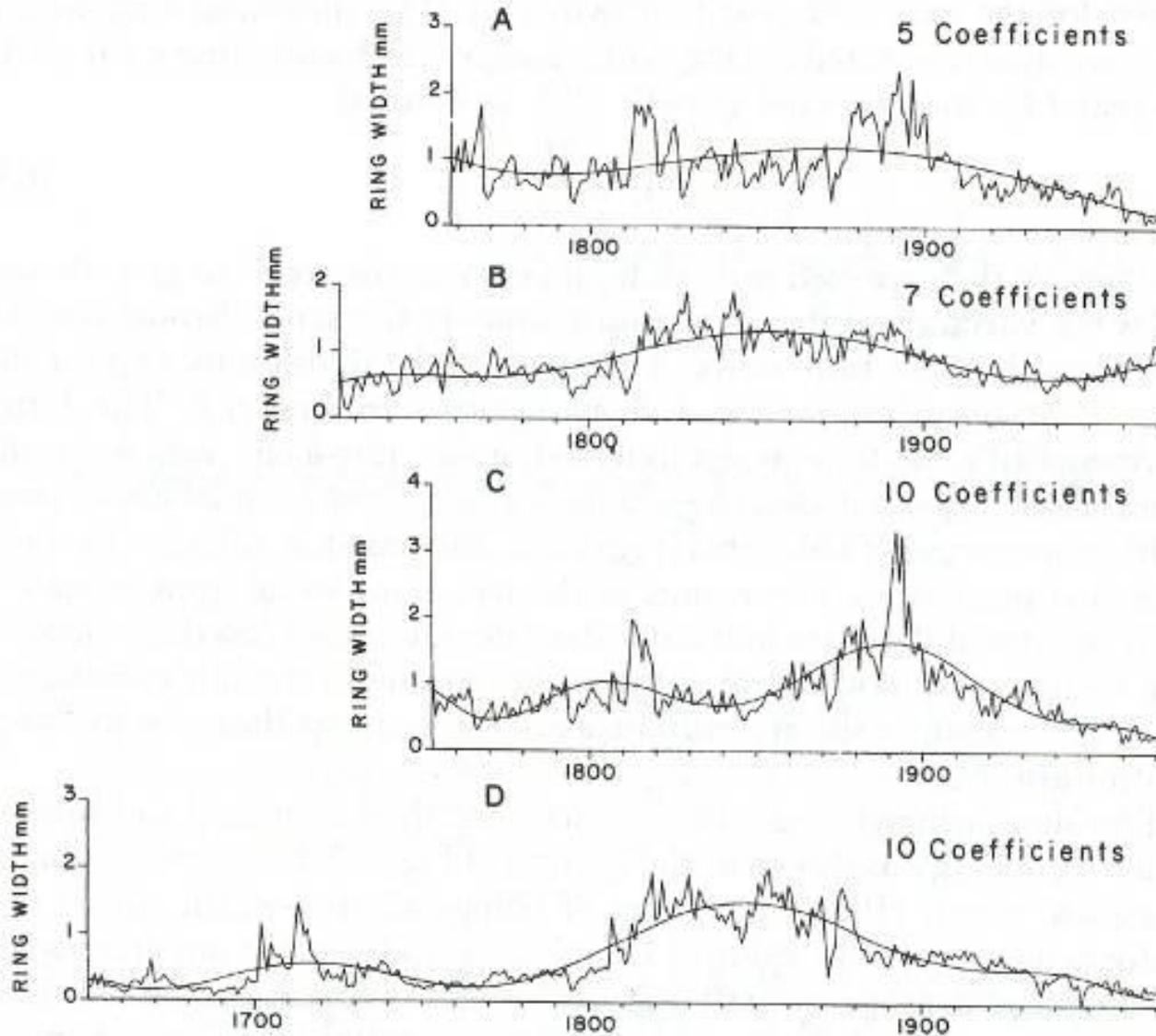
Построение кривых максимально возможного прироста (С.Г. Шиятов, 1970)

Возрастная кривая по дендрохронологическим данным для заполярного круга выражена слабо. Средняя норма прироста многих деревьев имеет волнообразный вид.

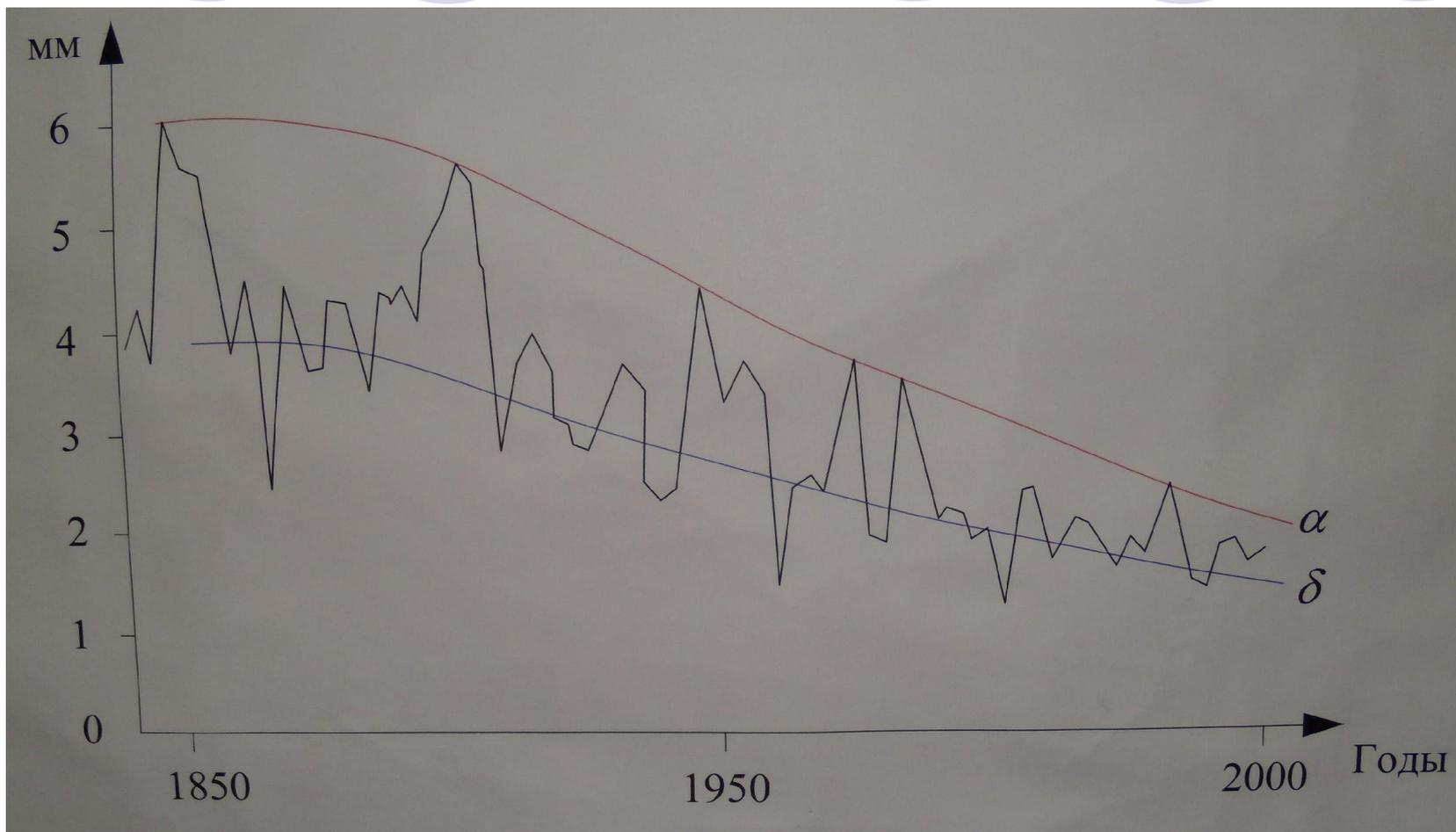
Возрастные изменения прироста лучше отражает кривая максимально возможного прироста в данных условиях. (Норма прироста проявляется через максимальные приросты отдельных лет).

Даже при длительных (вековых) ухудшениях климатических условий имеются кратковременные периоды и отдельные годы, благоприятные для роста деревьев, когда прирост достигает максимально возможной величины в данных условиях.

- Standardization



При расчёте индексов прироста древесины неизвестного происхождения, С.Г. Шиятов предлагает принимать за норму кривую не среднего, а максимально возможного прироста. В этом случае индексы находятся в пределах от 0 до 100 %.



α - кривая максимально возможного прироста (метод Шиятова)
 β - кривая средней нормы прироста (метод Оленина)

Построение кривых средней нормы прироста (С.М. Оленин, 1974)

С.М. Оленин считает, что кривая максимально возможных приростов является верхней границей фенотипа по данному признаку (радиальный прирост древостоев) при тех или иных условиях окружающей среды.

В качестве кривой 100 %-го прироста может быть линия, находящаяся между кривыми максимально возможных и минимально возможных приростов.

С.М. Олениным, для Коми АССР, установлено, что максимальная величина индексов прироста для сосны в основном не превышает 140 %, а для ели - 160 %.

Расчёт нормы прироста, по методу С.М. Оленина:

Для каждого образца строится график изменения ширины годовых колец. Максимальные значения приростов соединяют плавными кривыми.

Кривая максимальных приростов, принимается за кривую 140 %-го прироста у сосны и 160 %-го прироста у ели.

Кривую 100 %-го прироста вычисляют по формулам:

$$\text{для сосны } a = b/140 \times 100 ;$$

$$\text{для ели } a = b/160 \times 100, \text{ где}$$

a - значение прироста (в абсолютных единицах), соответствующее 100 %-ному приросту;

b - то же, но соответствующее 140 %-ному приросту для сосны и 160 %-ному для ели.

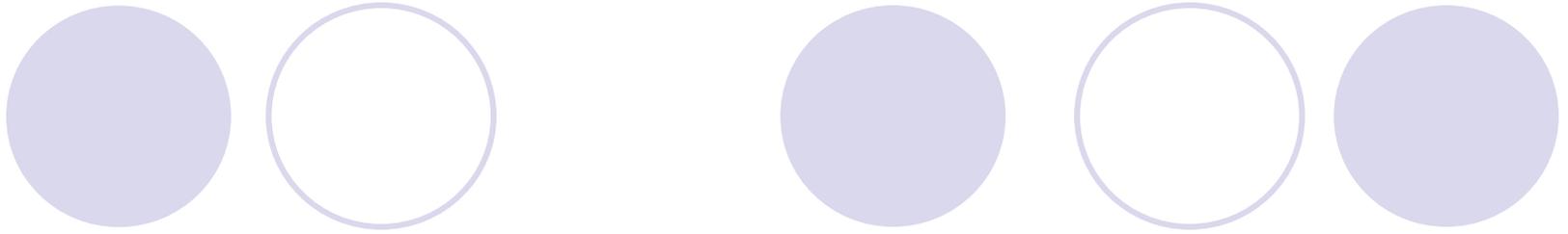
Величина "b" берется с графиков.

Расчёт относительных индексов (Покорни, 1867)

Покорни предложил 10-летние средние радиального прироста, интерполированные по годам, сопоставлять с действительной шириной годовых колец для получения коэффициентов влияния на них метеорологических факторов.

Метод индексов радиального текущего прироста довольно объективно исключает фактор возраста и даёт независимые от него величины, тем самым отражая влияние комплекса остальных факторов, лимитирующих рост деревьев, главным образом климатических.

Впервые в СССР данный метод использовал В.Е. Рудаков (1951).

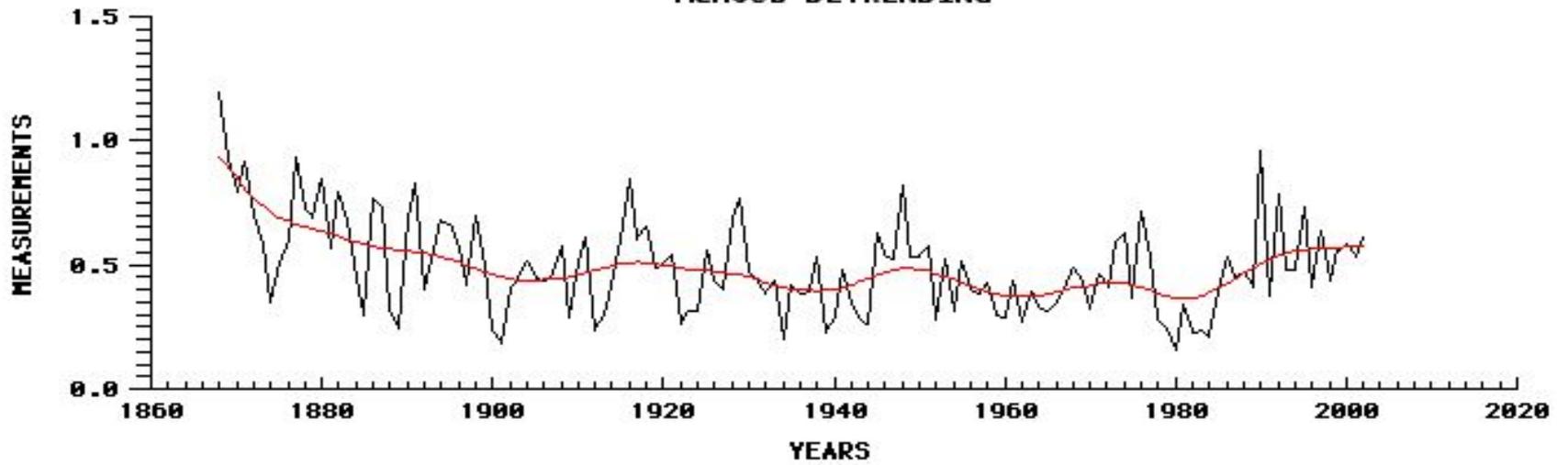


Рудаков рекомендует для вычисления средней скользящей нормы брать такой период осреднения, при котором скользящие средние кривые прироста получаются наиболее плавными.

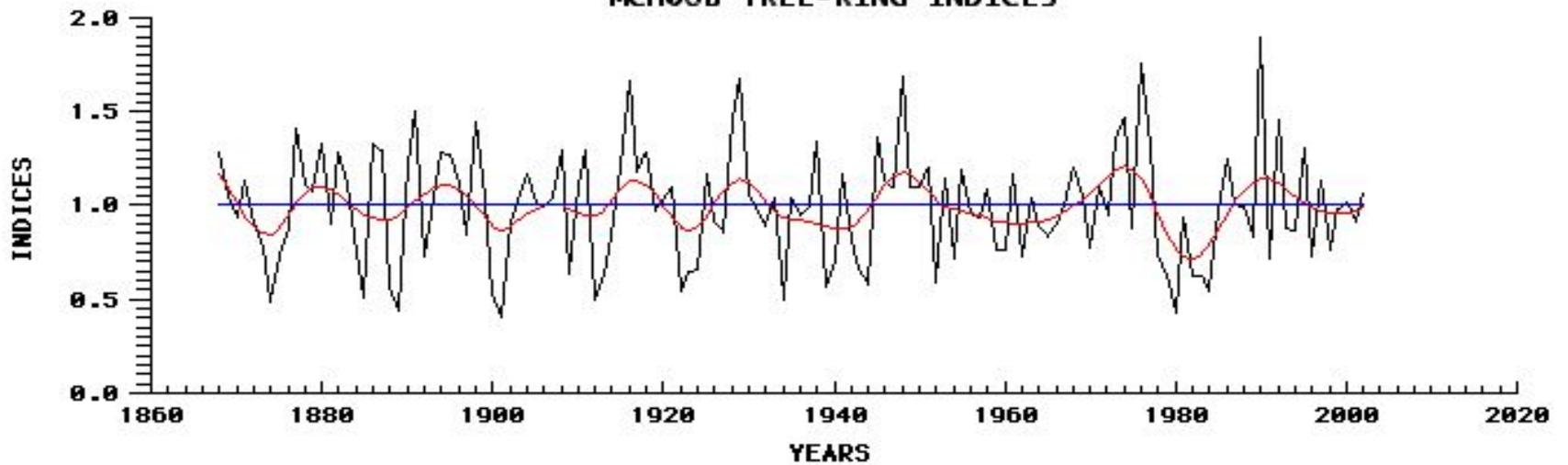
Относительные величины - **индексы** - определяются не только по возрастным кривым, рассчитанным способом скользящих, но и по биологическим кривым, рассчитанным другими методами.

- Standardization

MCH06B DETRENDING

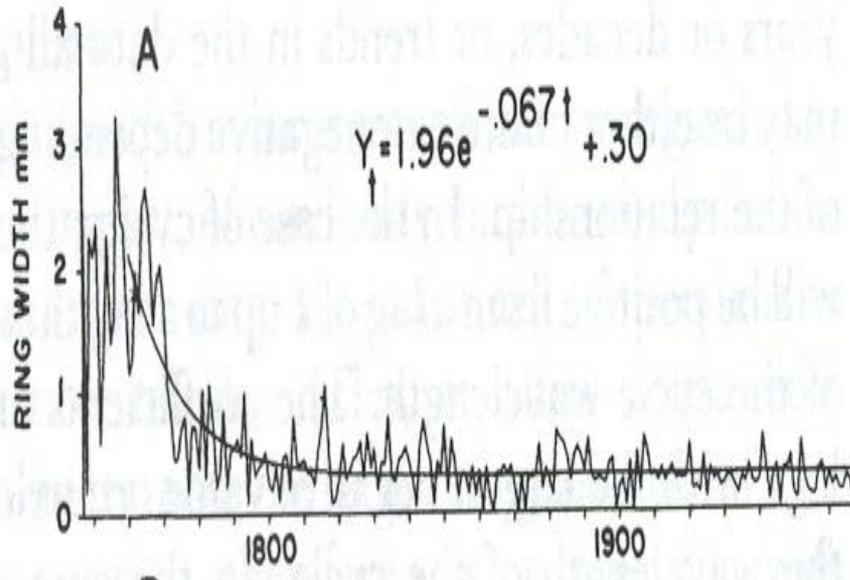


MCH06B TREE-RING INDICES

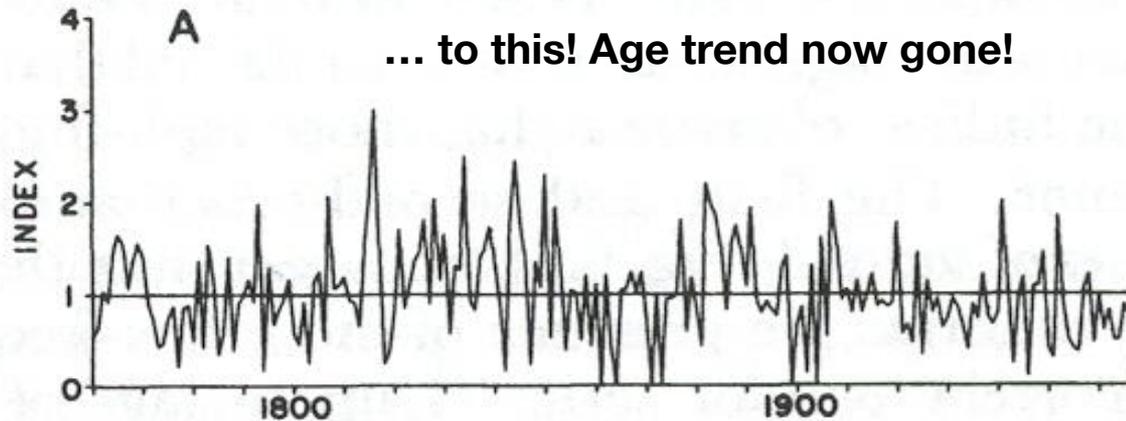


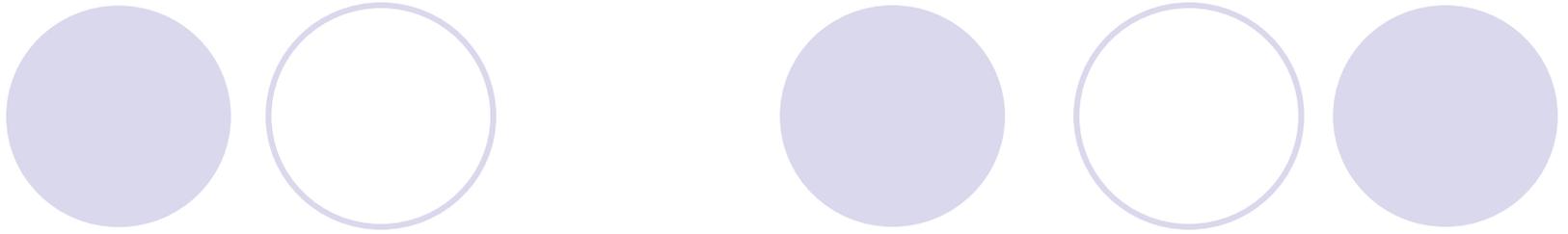
- Standardization

We go from this ...



... to this! Age trend now gone!





Универсальная формула для расчета относительных индексов прироста следующая:

$$I = I_F / I_s \times 100 \%, \text{ где}$$

I - относительный индекс, в %,

I_F - фактическая ширина годичного кольца,

I_s - средняя ширина годичного кольца,

отражающая его изменчивость в зависимости от возраста любым корректным способом, в том числе и способом скользящих.

Другие методы обработки данных измерений ширины годичных колец:

Метод интегрально-разностных кривых

Обозначим значения ряда замеров ширины годичных колец: $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$.

Среднее арифметическое значение (A_n) этого ряда рассчитываем обычным осреднением ($A_n = 1/n \sum a_i$), а отклонения каждого значения ряда от среднего по формуле: $d = a_i - A_n$.

Члены интегрально-разностного ряда рассчитываются нарастающим итогом, с учётом знака:

$$d_1, d_1+d_2, d_1+d_2+d_3, \dots, d_1+d_2+\dots+d_n.$$

На графике откладывается начальное (первое) значение (выше или ниже нуля), а к нему прибавляются (в масштабе) или отнимаются, в зависимости от знака, последующие значения.

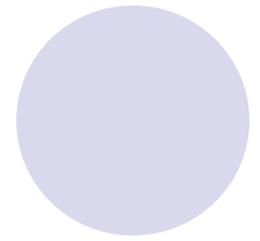
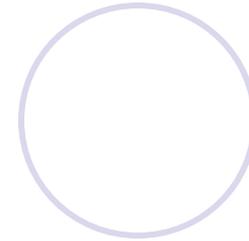
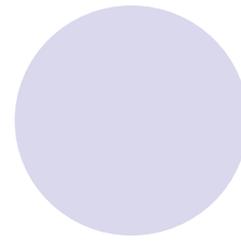
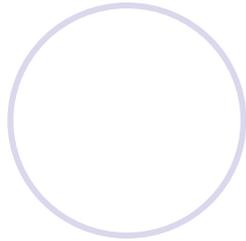
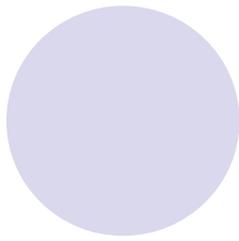
Метод «фазового портрета» Б.В. Арбузов (1993)

Оригинальный метод оценки биологической устойчивости древостоев (на основе анализа упорядоченности и закономерности в динамике радиального прироста).

Б.В. Арбузов представил данные замеров радиального прироста в виде "фазового портрета":

По оси абсцисс откладываются значения прироста в момент времени t (it), а по оси ординат - в момент времени $t+1$ ($it+1$) и так далее.

Последовательно соединяя полученные точки между собой, получаем траекторию, описывающую поведение динамической системы, выходом которой является величина радиального прироста.



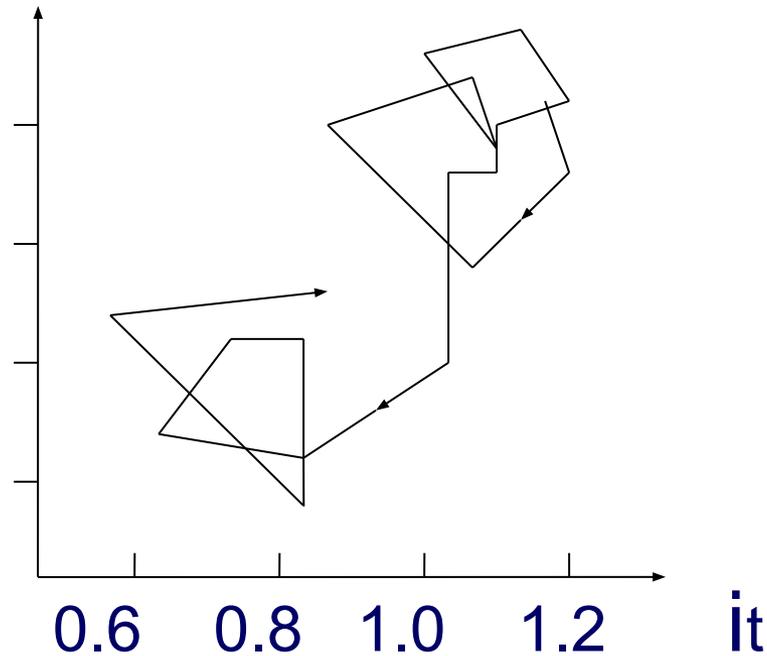
- $it + 1$

- 1.2

- 1.0

- 0.8

- 0.6



- **Метод «фазового портрета»: сосняк зеленомошник**



Определение объёмного прироста (Г.Б. Гортинский, 1969)

Г.Б. Гортинский при анализе погодичной изменчивости продуктивности еловых древостоев южной тайги, определял прирост биомассы стволов не по ширине годовичных колец, а **по площади их сечения.**

Это более совершенный способ, так как он позволяет перевести данные в единицы объёмного прироста, но значительно увеличивающий объём камеральной работы.

П.А. Феклистов, В.Н. Евдокимов, В.М. Барзут (1997) предложили упрощенный **метод расчета объёмного годичного прироста** для спелых сосновых древостоев.

Обмеряют учётные деревья, из всех ступеней толщины пропорционально представительству стволов в ступени. У учетных деревьев замеряют:

- диаметр на высоте груди,
- высоту дерева
- годичный радиальный прирост на кернах.

По данным замеров радиального прироста рассчитывают площади годичных слоев (прирост по площади сечения ствола).


$$ПР_1^2 - ПР_2^2 = Z_{s_{1,3}} \text{ (прирост по площади годичного слоя)}$$

Годичный объемный прирост каждой ступени толщины рассчитывается по формуле:

$$Z_v = Z_{s_{1,3}} \times H \times 0,76, \text{ где}$$

Z_v - годичный объемный прирост;

$Z_{s_{1,3}}$ - прирост по площади годичного слоя на высоте 1,3 м;

H - высота ствола.

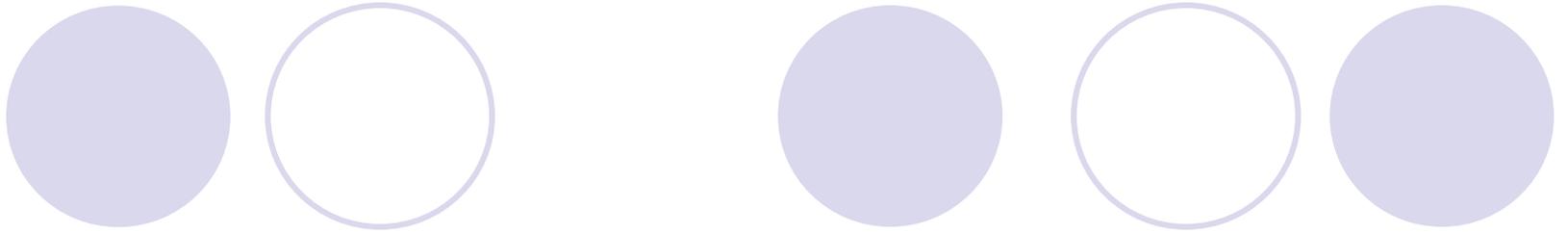
Прирост всех ступеней толщины (за год):

$$Z_M = Z_{v_1} \times n_1 + Z_{v_2} \times n_2 + Z_{v_3} \times n_3 \dots Z_{v_n} \times n_n$$

или

$$Z_M = Z^1_{s_{1,3}} \times H_1 \times C + Z^2_{s_{1,3}} \times H_2 \times C + \dots + Z^n_{s_{1,3}} \times H_n \times C$$

C – постоянная, равная 0,76



***Методы изучения динамики
радиального прироста во времени и
связей с климатическими факторами:***

- а) визуальный анализ рядов**
- б) метод наложенных эпох**
- в) гармонический анализ и анализ спектральной плотности рядов**
- г) статистические методы анализа
(корреляционный анализ, регрессия признаков)**



а) визуальный анализ рядов:

Исследуются, как правило, графики ширины годовых колец в зависимости от возраста в абсолютных единицах (мм) и в относительных индексах (%).

Этот метод позволяет дать оценку общего характера динамики прироста, выявить даты экстремумов, проследить изменения амплитуды и частоты колебаний, выявить цикличность колебаний прироста.

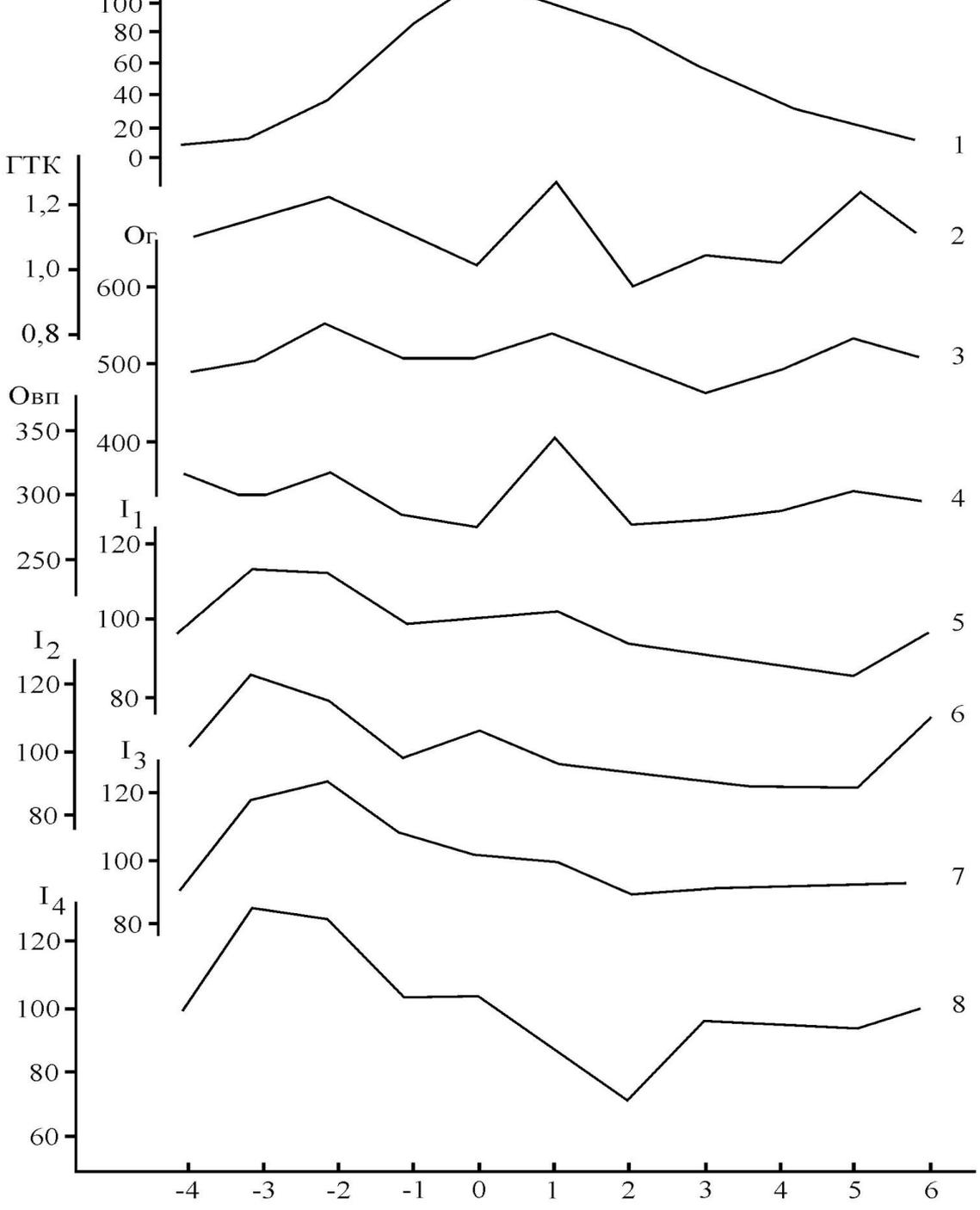
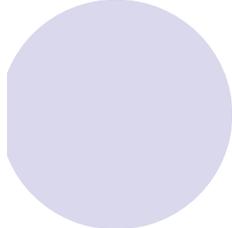
б) метод наложенных эпох:

Анализ динамики прироста (в относительных индексах) и колебаний климатических факторов проводится в пределах 11-летнего цикла солнечной активности.

За нулевой (реперный) год принимается год максимума солнечной активности в 11-летнем цикле.

За исследуемый период (несколько 11-летних циклов, в зависимости от длины ряда) рассчитываются средние значения показателей для нулевого года, предшествующих и последующих лет для

- солнечной активности (в числах Вольфа),**
- осадков,**
- температуры,**
- ГТК,**
- индексов прироста и др.**



в) гармонический анализ и анализ спектральной плотности рядов

Циклы климата и прироста деревьев за длительный период (свыше 300-500 лет) не постоянны.

Некоторые циклы имеют прерывистый, затухающий характер, зависимости признаков могут менять свой знак на противоположный.

Однако за 300-500 лет циклы можно считать более или менее стабильными.

Затрудняет анализ цикличности временных рядов смешение (наложение) большого числа различных во времени циклических составляющих.

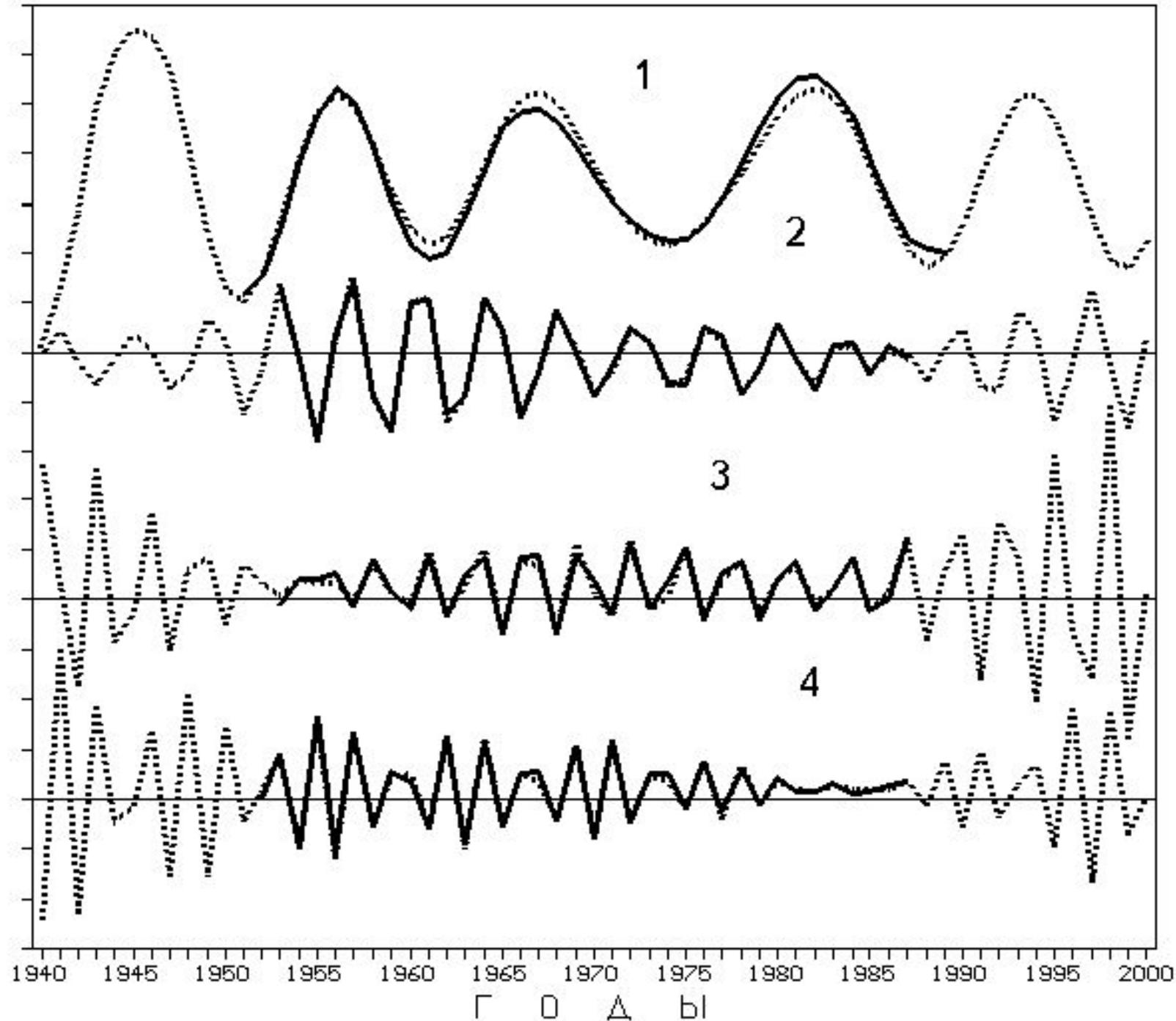
Гармонический анализ:

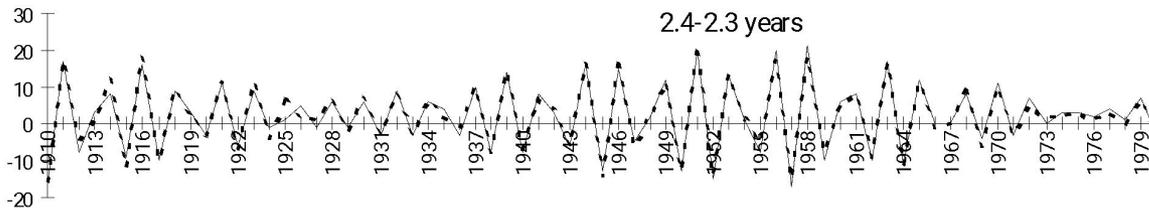
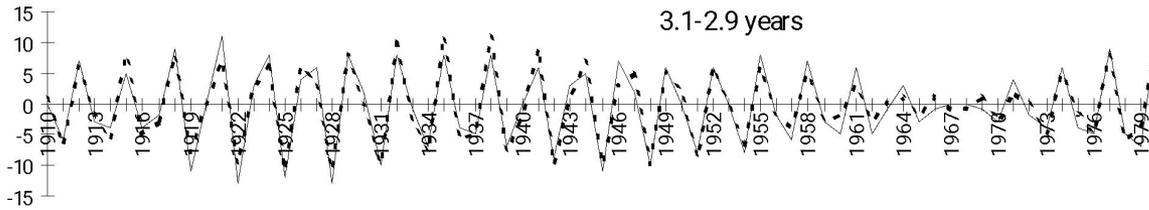
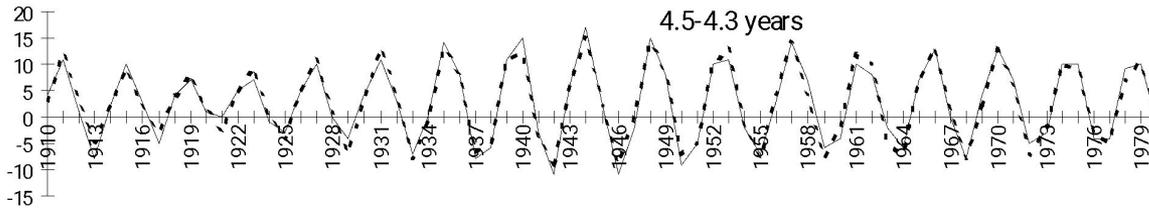
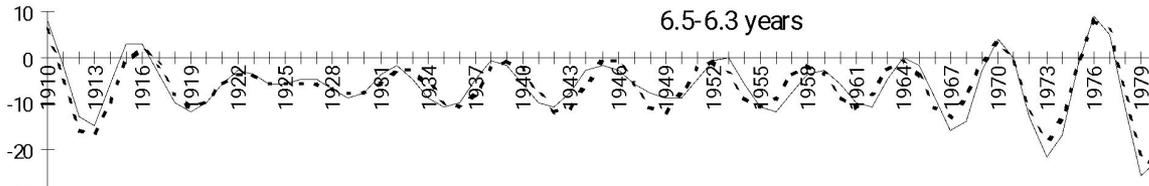
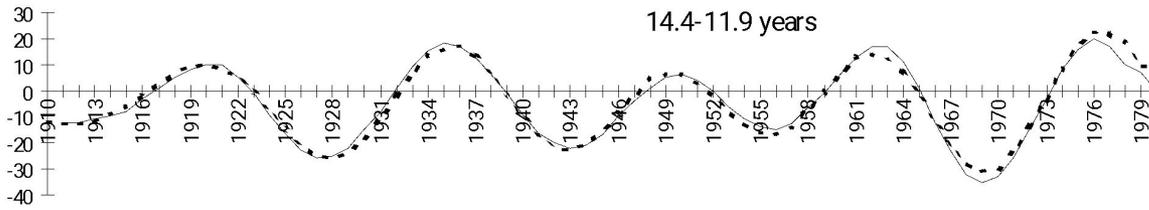
внутрирядный анализ цикличности и динамики колебаний прироста за многолетний период.

Временной ряд ширины годичных колец (дендрохронологический ряд) представляется в виде суммы нескольких гармонических составляющих.

Определяются амплитудные характеристики каждой из гармоник, период, частота, начальная фаза колебаний и средний прирост вокруг которого происходят колебания.

Если какой либо стационарный процесс (в том числе временной ряд динамики прироста) может быть представлен в виде бесконечной суммы гармоник - его называют **спектральным**.





Спектральный анализ:

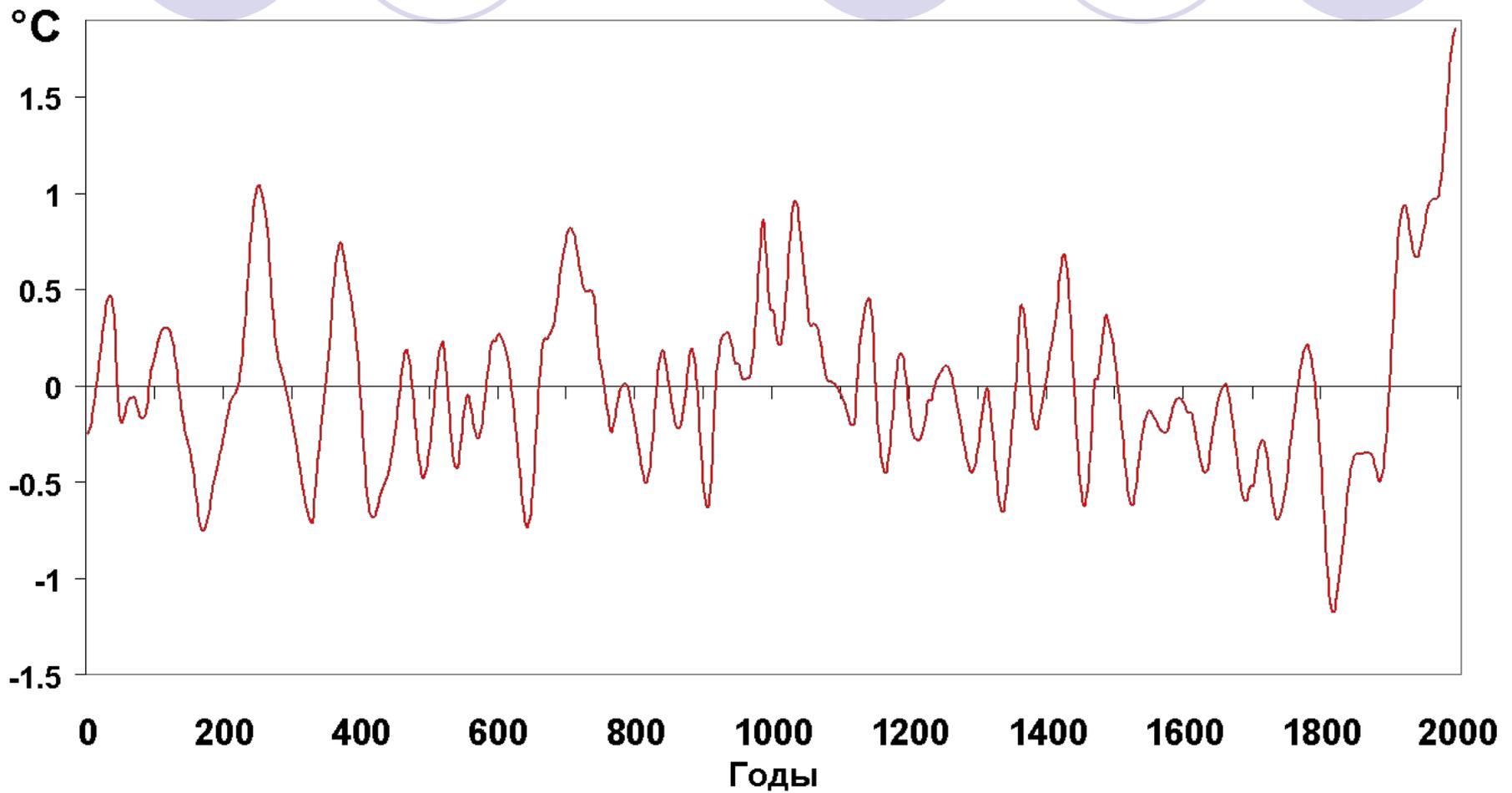
Распределение дисперсий процесса по частотам называют функцией спектральной плотности этого процесса.

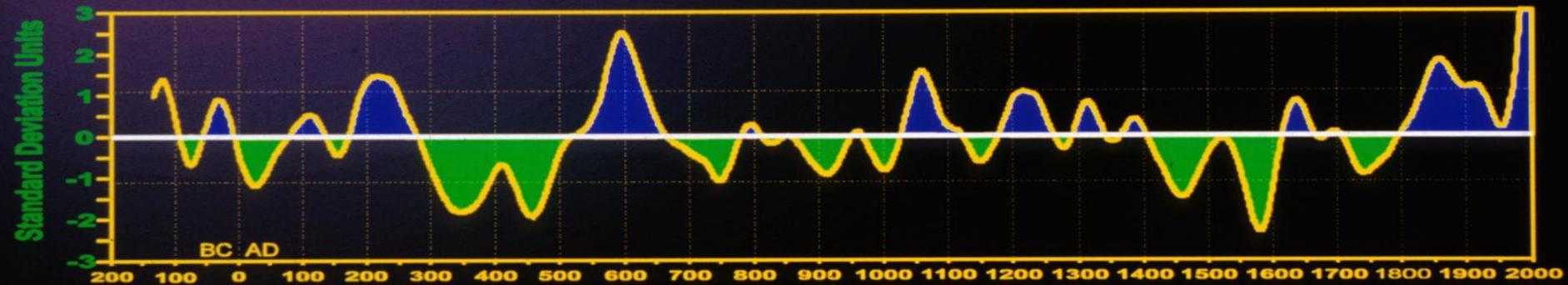
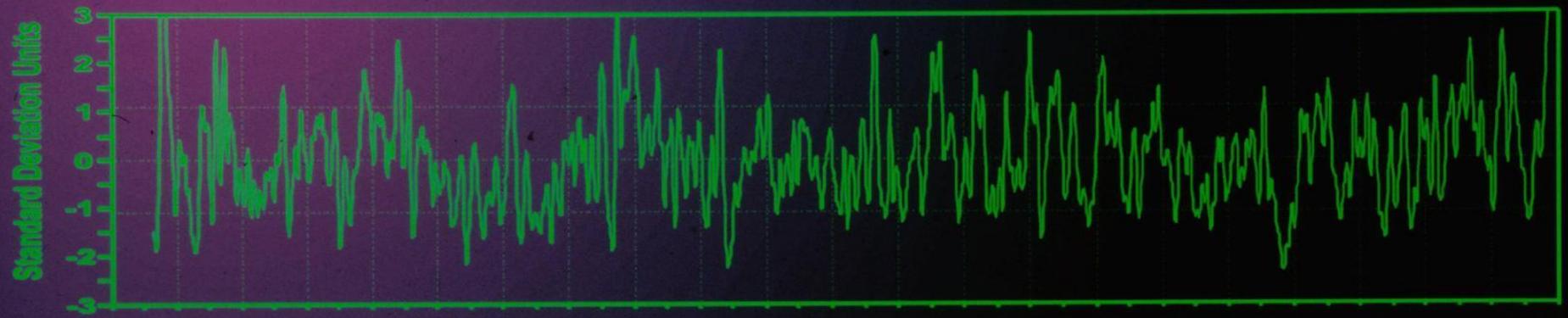
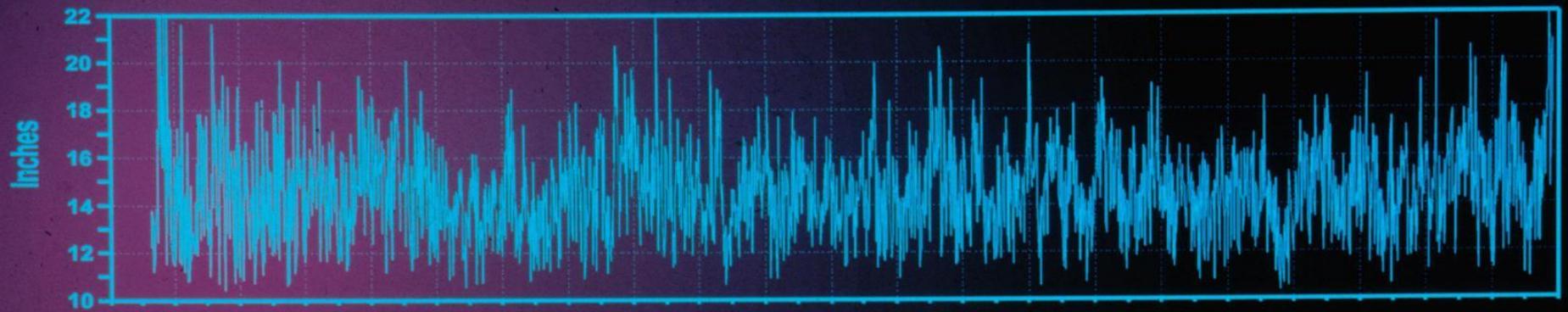
(Дисперсия - сумма квадратов центральных отклонений, или - сумма квадратов разностей между каждой датой и средней арифметической).

При анализе функции спектральной плотности, всякий "всплеск" функции на интервале ее определения должен интерпретироваться как увеличенный вклад соответствующих частотных составляющих в общую дисперсию.

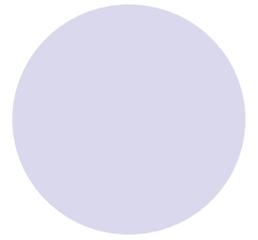
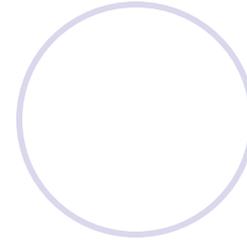
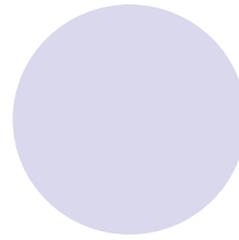
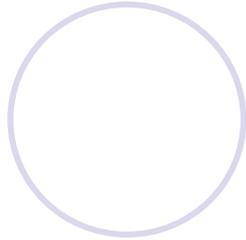
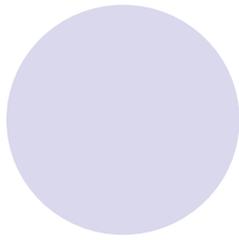
Большинство пиков в спектральной плотности дендрохронологического ряда приходится на определенные полосы частот (например: 24; 16-17; 11-12; 8-9; 6,5-7,0; 5,5-6,0; 4,3-4,5; 3,7-4,0 и т.д.)

График реконструкции температур наглядно иллюстрирует наличие разночастотных (и разноамплитудных) составляющих;





Кривая представляет информацию сотен деревьев (El Malpais, национальный памятник, Нью-Мексико).



г) статистические методы анализа (корреляционный анализ, регрессия признаков)

Эмпирические исследования не могут оценить устойчивость и степень надежности связей между приростом древостоев и факторами среды и представить в количественном виде основные закономерности.

В биологических исследованиях, как правило, каждому определенному значению **первого признака** (например, осадки за год, или температура) соответствует не одно значение **второго признака** (например, ширина годовых колец), а целое распределение этих значений, при определенных основных показателях этого частного распределения - средней величины и степени разнообразия.

Такая связь называется **корреляционной связью или просто корреляцией.**

Корреляционная связь параметров определяется следующими показателями:

- ❖ форма связи (мера линейности) (γ) - связь прямолинейная или криволинейная ($\gamma > 2$ - связь не линейная);
- ❖ направление связи - прямая или обратная;
- ❖ коэффициент корреляции (r) - для прямолинейной связи;
- ❖ корреляционное отношение (η) - для криволинейной связи.

Корреляционные зависимости между индексами прироста сосны обыкновенной и климатическими факторами

Климатические показатели	Коэффициент корреляции, r	Корреляционное отношение, η	Мера линейности, γ	Характер связи
Солнечная активность	$0,06 \pm 0,096$	$0,41 \pm 0,081$	4,15	Умеренная
Осадки за вегетационный период	$0,36 \pm 0,085$	$0,55 \pm 0,068$	4,32	Значительная
Осадки за год	$0,35 \pm 0,085$	$0,54 \pm 0,069$	4,16	Значительная
ГТК	$0,34 \pm 0,086$	$0,60 \pm 0,063$	5,02	Значительная

Нелинейная связь точнее описывает зависимости между радиальным приростом деревьев и климатическими факторами. Для дальнейшего анализа этих зависимостей необходимо определить регрессию изучаемых признаков, т.е. исследовать формы зависимости функции от различных аргументов, выраженные математическими уравнениями. (*Регрессия - изменение функции при определенных изменениях одного или нескольких аргументов*).

Для этого следует:

- ♦ Определить форму связей, т.е. найти математическое уравнение (уравнение регрессии) зависимости изучаемого признака от других признаков;
- ♦ Рассчитать коэффициенты этого уравнения (коэффициенты регрессии) - т.е. величины, на которые в среднем изменяется второй признак, при изменении первого на единицу измерения.

Чем ближе теоретический ряд, построенный по такому уравнению, к эмпирическому - тем точнее рассчитанная математическая модель.

Высокий достоверный коэффициент линейной корреляции ($r = 0,68$) между солнечной активностью, выраженной в числах Вольфа и индексами прироста сосны генерализованного ряда позволяет провести однофакторное математическое моделирование прироста сосны по значениям солнечной активности.

Модель показывает только общее направление изменчивости прироста, так как высокочастотные ежегодные колебания исключены сглаживанием.

Проанализирована пригодность и рассчитаны коэффициенты следующих уравнений регрессии:

линейная зависимость, $y = 79,63633 + 0,26160x$

парабола, $y = 83,70531 + 0,09971x + 0,00099x^2$

гипербола, $y = -361,70773/x + 108,59157$

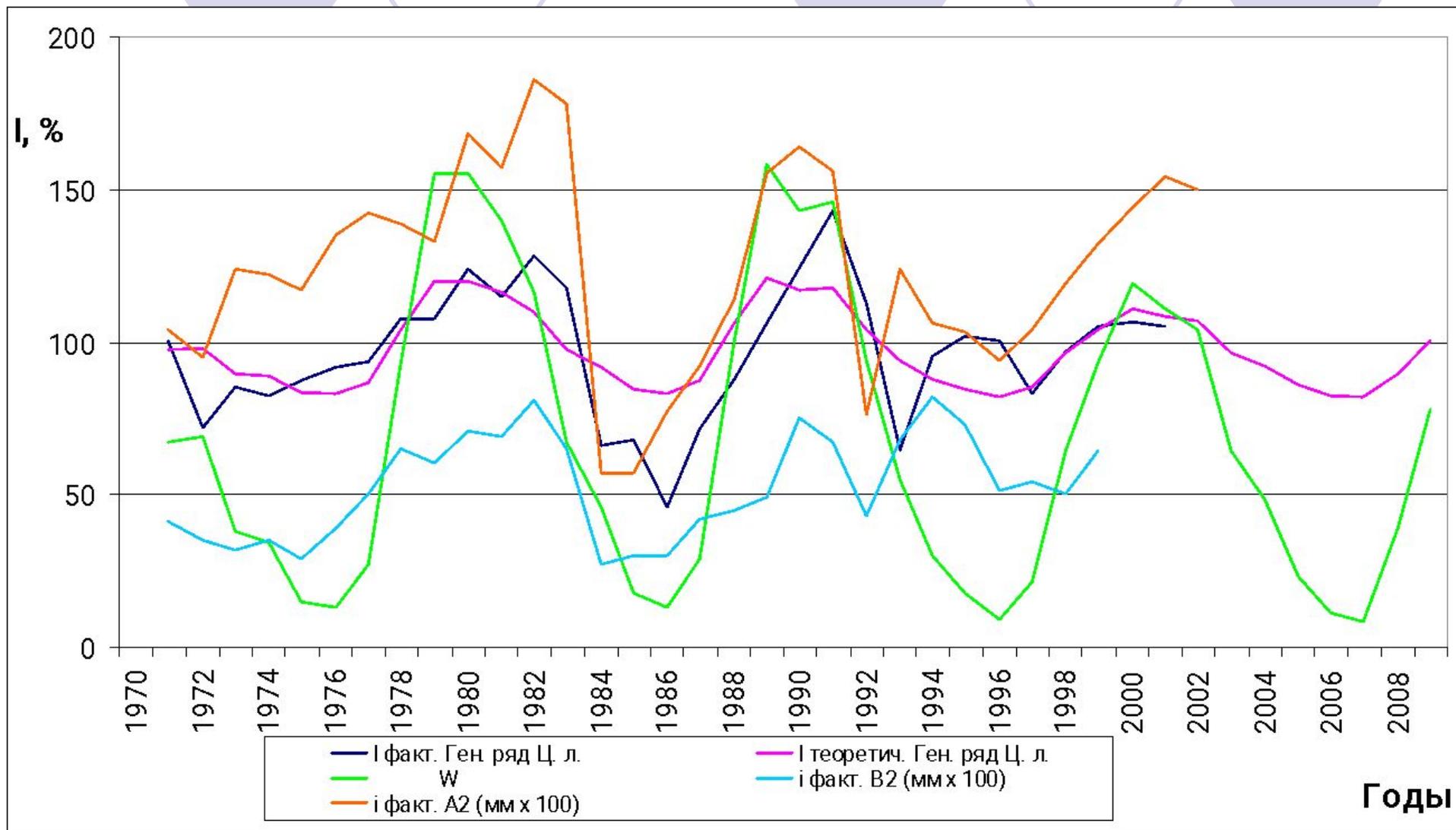
показательная функция, $\log y = 1,90414 + 0,00112x$

степенная функция, $\log y = 1,75353 + 0,13449 \times \log x$

Из рассмотренных вариантов наибольший фактический критерий Фишера (F_f) показали параболическая и линейная зависимости, причем линейное уравнение значительно проще.

На основе линейной модели рассчитан теоретический ряд сглаженных индексов прироста за исследуемый период (30 лет)

Фактический и теоретический (до 2009 г.) прирост сосны обыкновенной генерализованного ряда и фактический прирост сосны в ТЛУ А2, В2



Коэффициент чувствительности

- **Коэффициент чувствительности** (относительная величина межгодовой изменчивости прироста в сериях годовых колец индивидуальных хронологий – абсолютное значение разности соседних значений ширины годовых колец, деленной на их среднюю величину). Серия колец считается чувствительной, когда коэффициент чувствительности больше 0,3

$$K_{\div} = \frac{2}{n-1} \sum_{t=1}^{n-1} \frac{|x_{t+1} - x_t|}{|x_{t+1} + x_t|}$$

$$K = \frac{i_1 - i_2}{(i_1 + i_2)/2}$$

Отношение сигнал-шум

- **Отношение сигнал-шум** (показатель взаимокорреляции индивидуальных хронологий использовавшихся для построения обобщенной хронологии)

$$SNR = \frac{N \cdot r}{1 - r}, \quad SNR = \frac{N \bar{r}}{(1 - r)}$$

- где, r – средний коэффициент корреляции между индивидуальными рядами всех рядов прироста данного участка;
- N – количество рядов.

Коэффициент синхронности

- **Коэффициент синхронности** (оценивает число однонаправленных изменений от года к году между двумя хронологиями)

$$K_{\tilde{n}i} = \frac{n^+}{n} * 100\% \quad S = \frac{n^+}{n-1} 100\% |$$

- где, n^+ – количество совпавших по направлению годовых отрезков двух хронологий;
- n – длительность интервала времени сравниваемых хронологий.