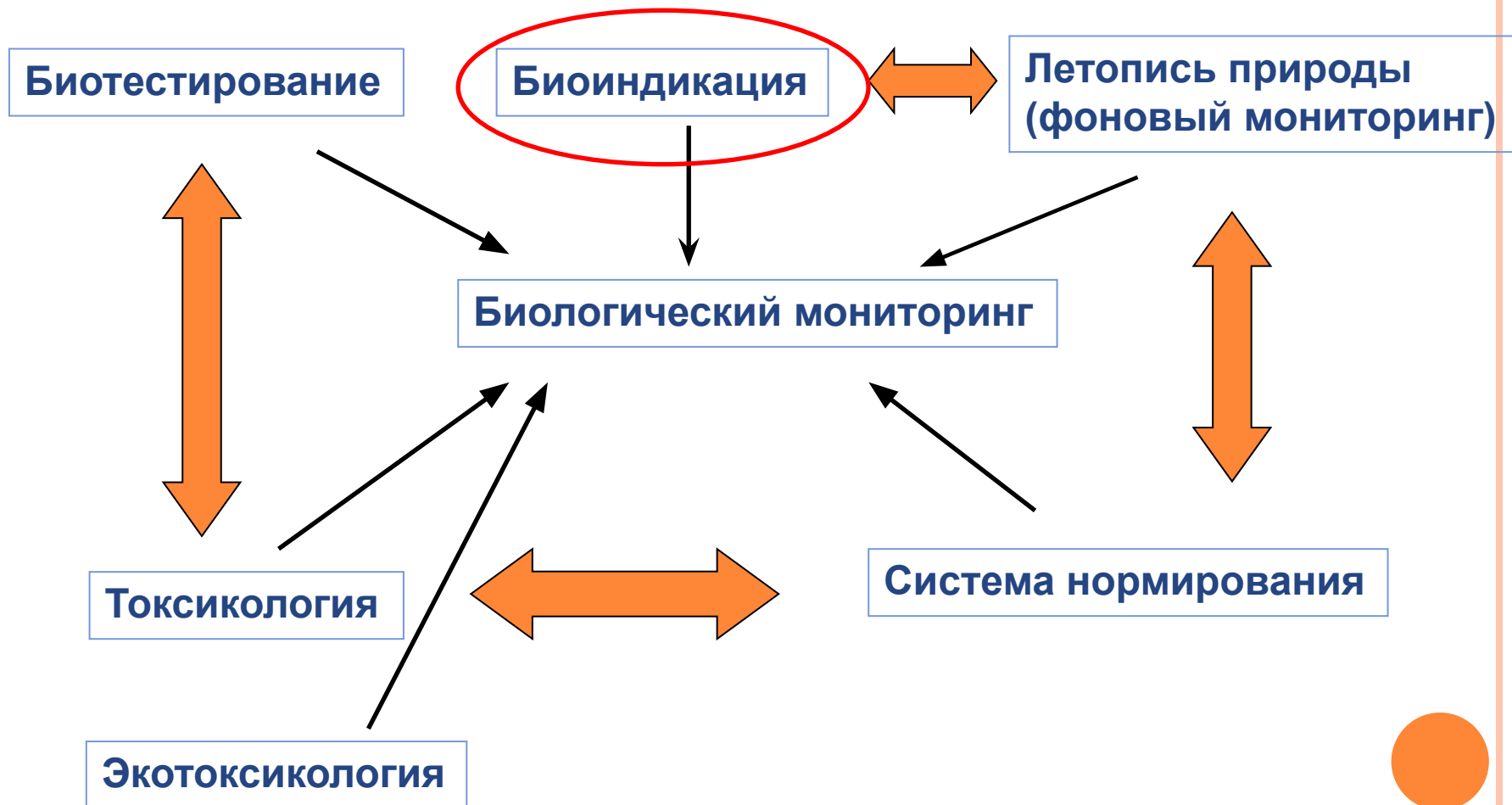




**Дисциплина**  
**«БИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ»**

**Лекция № 5.** Методы и основы биоиндикации

# Структура биологического мониторинга



*Наиболее часто цитируемой и, в то же время, наиболее идеологически расплывчатой областью экологии является некоторая совокупность методов, называемая “биоиндикацией” (Шитиков с соавт., 2003).*

**Биоиндикация** – совокупность методов и критериев оценки качества среды обитания на основе реакций живых организмов и их сообществ в естественных условиях.

**Биоиндикация** – определение и обнаружение биологически значимых антропогенных нагрузок на основании реакции на них живых организмов непосредственно в среде их обитания.

**Биоиндикация** – метод обнаружения и оценки абиотических и биотических факторов местообитания при помощи биологических систем.

**Биоиндикация** - оценка качества среды обитания и ее отдельных характеристик по состоянию ее биоты в природных условиях.

**Биоиндикация** – метод определения качества среды обитания организмов по видовому составу и показателям количественного развития видов биоиндикаторов и структуре образуемых ими сообществ.

**Биоиндикация** – это оценка качества среды по состоянию тех или иных представителей ее населения – биоты, осуществляемая путем наблюдения за ними, без активного (экспериментального) вмешательства в природные процессы.



## Ключевые положения

1. **Биоиндикация – область и Экологии и Биологического мониторинга**
2. **Оценивается Качество среды обитания и Факторы среды обитания**
3. **В качестве оценочного параметра используется Реакция живых организмов**
4. **Оценка реальной ситуации, а не эксперимент\***

\* - активная биоиндикация



## Биоиндикация как наука?

- специальная терминология
- специальные законы

Экология  
Общая теория систем,  
Системная экология/биология

Экосистема / окружающая среда



- Информация об объекте системы
- **Информация о системе**

Биоиндикатор - особь-группа особей одного вида или сообщества, по наличию или по состоянию которых, а также по их поведению судят о естественных и антропогенных изменениях в среде



# Проблемы биоиндикации



Многообразие естественных факторов



Многообразие антропогенных факторов

**Экосистема / окружающая среда**



**Разнообразие биологических переменных характеризующих биоиндикатор**

- специфические реакции
- неспецифические реакции



**Разнообразие критериев качества среды**



## Задача биоиндикации – плохо формализуемая, по причине

1. существенной многомерностью факторов среды и измеряемых параметров экосистем;
2. сильной взаимообусловленностью всего комплекса измеренных переменных, не позволяющей выделить в чистом виде функциональную связь двух индивидуальных показателей  $F(y,x)$ ;
3. нестационарностью большей части информации об объектах и среде;
4. трудоемкостью проведения всего комплекса измерений в единых координатах пространства и времени, в результате чего обрабатываемые данные имеют обширные пропуски.

### Пути решения

1. сформированы банки многолетних данных по наблюдениям за природными экосистемами;
2. разработан и апробирован ряд методов и математических моделей интегральной оценки состояния сложных систем различного типа, позволяющих, по терминологии А.П. Левича и А.Т.Терехина [1997], осуществлять “поиск детерминации и распознавание образов в многомерном пространстве экологических факторов для выделения границ между областями нормального и патологического функционирования экосистем”;
3. развиваются аппаратные и программные информационные компьютерные технологии, позволяющие анализировать необходимые массивы экологических данных;
4. существует огромный объем неформальных знаний высококвалифицированных специалистов, частично сконцентрированный в методических разработках [Экологический мониторинг., 1995; Мокров, Гелашвили, 1999].

# Истоки биоиндикации

## Краткий исторический очерк развития биоиндикации

Период	Авторы	Направление исследований
234-149 гг. до н. э.	Катон Старший	Выбор участков, пригодные для посева культур бобовых по густоте травостоя до перепашки;
36-29 гг. до н.э.	Вергилий	Каменистость и расчлененный рельеф указывают на территории, пригодные для возделывания маслин; заросли папоротников типичны для земель, осваиваемых под виноградники
24-79 гг. до н.э.	Плиний Старший	Признаки плодородия почвы по характеру растительности
I в. до н. э.	римский агроном Колумелла	Определение свойств почвы по листве деревьев и травам; выбор участков для посадок винограда по диким растениям;
	римский инженер Витрувий	Признаки присутствия воды в породах по растениям
XVII-XVIII вв.	Гумбольдт	Зонально-климатическое распределение растительности
XIX в.	Унгер (1838)	Индикационный характер изучения географии растений - растения на кальцефилы и силицифилы; три группы растений: почвобезразличные, почвопредпочитающие, почвопостоянные.
	Гризебах (1872)	Составление карт климатов по ботаническим данным
	Карпинский (1841)	Учение о комплексных индикаторах - растительных сообществах; схемы растений-индикаторов горных пород;
	Рупрехта (1866) Краснов (1888) Аболин (1910)	Учение о формациях как организованных группах растений, приуроченных к определенным, им свойственным, почвам и климату.



Первое направление работ по биоиндикации – утилитарные работы, в области общей экологии. Биоиндикаторы как дешевый аналог аналитического прибора. Внимание на факторах антропогенной природы не акцентируется.

## 2.2. Особенности использования растений в качестве биоиндикаторов

С помощью растений можно проводить биоиндикацию всех природных сред. Индикаторные растения используются при оценке механического и кислотного состава почв, их плодородия, увлажнения и засоления, степени минерализации грунтовых вод и степени загрязнения атмосферного воздуха газообразными соединениями, а также при выявлении трофических свойств водоемов и степени их загрязнения поллютантами. Например, на содержание в почве свинца указывают виды овсяницы (*Festuca ovina* и др.), полевицы (*Agrostis tenuis* и др.); цинка — виды фиалки (*Viola tricolor* и др.), ярутки (*Traspi alpestre* и др.); меди и кобальта — смолевки (*Silene vulgaris* и др.), многие злаки и мхи.

...Белка низко гнездо строит - быть морозной зиме, высоко -жди теплой погоды...

...Если рано утром пчелы дружно отправляются на медосбор - будет ясный день, сидят на прилетных досках - быть дождю...

**Биологический контроль окружающей среды: биоиндикация и биотестирование** : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / О. П. Мелехова, Е. И. Егорова, Т. И. Евсеева и др.; под ред. О. П. Мелеховой и Е. И. Егоровой. — М. : Издательский центр «Академия», 2007. — 288 с.



**Второе направление работ по биоиндикации** – описание фактического состояния биологического объекта, с нечеткой привязкой к факторам антропогенной природы. В качестве меры сравнения часто используется фон.

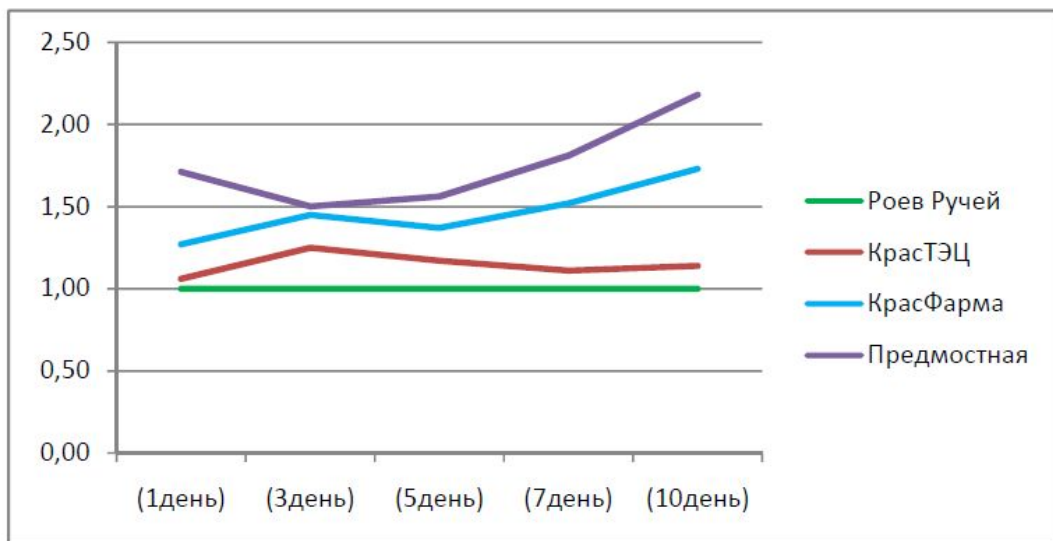
**БИОИНДИКАЦИЯ АТМОСФЕРНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ФЛУОРЕСЦЕНТНОГО МЕТОДА**

Фидельская К.В.

Научный руководитель - к. б. н., доцент Сорокина Г.А.

*Сибирский федеральный университет*

Образцы отбирались в пределах г. Красноярска с четырёх пробных площадок (ПП), разных по уровню атмосферного загрязнения, три из которых являются территориями, подверженными группам загрязнителей достаточно специфичных, ввиду расположения на них промышленных предприятий: р-н. КрасТЭЦ (зона сильного промышленного загрязнения), Свердловский р-н, прилегающая территория завода медицинских препаратов «КрасФарма» (интенсивные выбросы биологических загрязнителей) и р-н Предмостной площади (интенсивные выбросы выхлопных газов автомобильного транспорта). В качестве чистого (контрольного) района взята территория парка «Роев ручей».



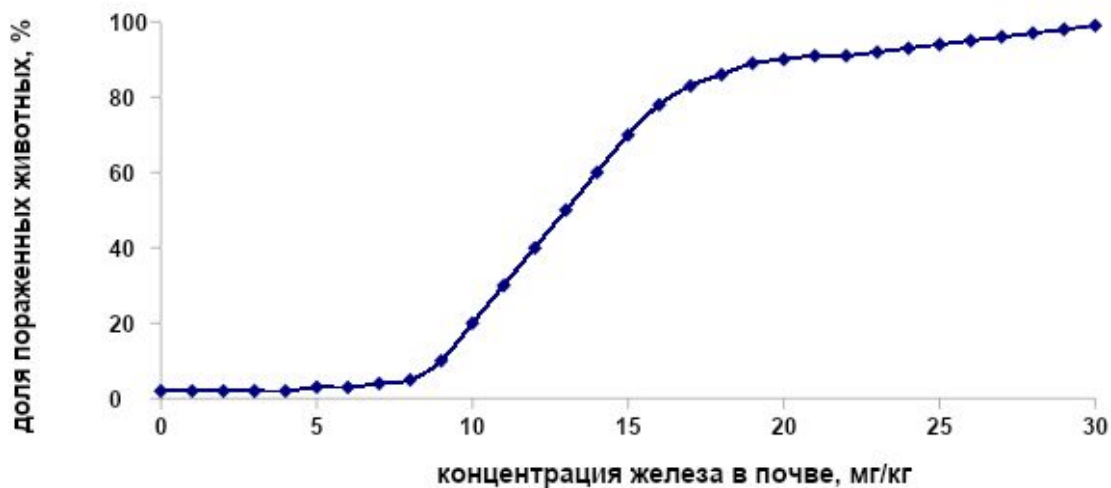
Таким образом, введение расчетного параметра А позволяет количественно оценить сравнительный уровень загрязнения атмосферы в разных районах города, что **позволяет** эффективно использовать метод регистрации термоиндуцированных изменений нулевого уровня флуоресценции для биоиндикации.

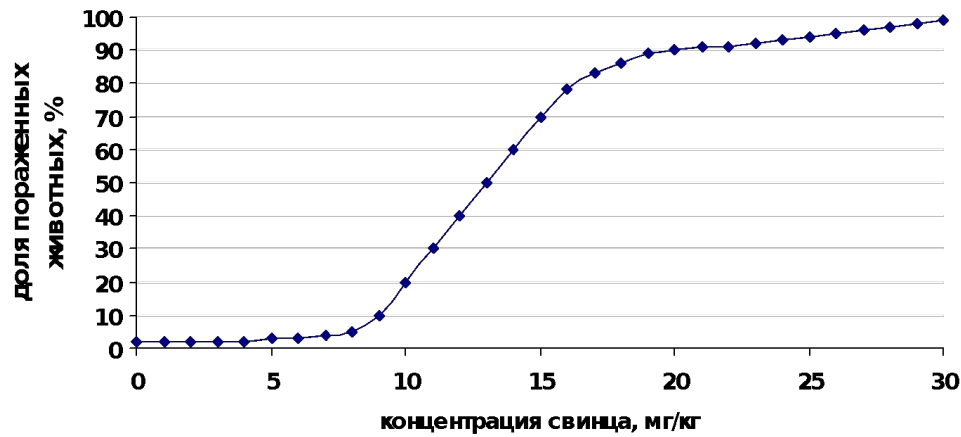
Рис.1 Величина параметра А в период выхода тополя бальзамического состояния покоя в лабораторных условиях.

## Третье направление работ по биоиндикации – описание функциональной связи между биологической переменной и фактором / факторами

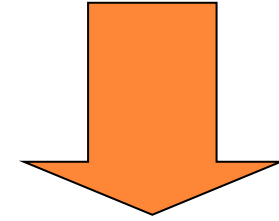
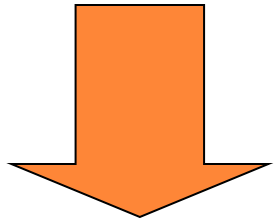
1. Выделение одного или нескольких факторов среды
2. Сбор полевых данных биоты в широком диапазоне варьирования исследуемого фактора
3. Оценка индикаторной значимости вида или группы видов

Состояние биологического объекта, Y	y1	y2	y3	y4
Состояние фактора, X	x1	x2	x3	x4



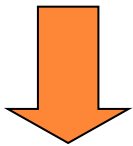


Изучение взаимосвязи – доза-эффект



## Токсикология

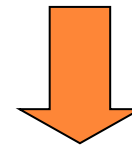
Возможность моделирования,  
 Возможность оценки доза-эффект,  
 Отсутствие экологического реализма



ПДК

## Биоиндикация

Сложности в формализации,  
 Сложности оценки доза-эффект,  
 Полный экологический реализм



ЭДУ (экологически допустимые уровни воздействия)



Четвертое направление работ по биоиндикации – разработка нормативов качества среды на основе априорных суждений или/и выявленной взаимосвязи между факторами и реакцией биоиндикаторов.

Пятое направление работ по биоиндикации – оценка качества среды по разработанным нормативам

Класс качества воды	Степень загрязненности воды	Гидробиологические показатели			Микробиологические показатели			Гидрохимический индекс загрязнения воды (ИЗВ)	Градации по В.А. Яковлеву [1988] индекса видового разнообразия Шеннона
		По фитопланктону, зоопланктону, перифитону	По зообентосу		Общее количество бактерий, $10^6$ кл/см <sup>3</sup> (кл/мл)	Количество сапрофитных бактерий, $10^3$ кл/см <sup>3</sup> (кл/мл)	Отношение общего количества бактерий к количеству сапрофитных бактерий, $10^3$ кл/см <sup>3</sup> (кл/мл)		
		Индекс сапробности по Пангелю и Бувзе (в модификации Сладечека)	Отклонение общей численности олигохет к общей численности донных организмов, %	Биотический индекс по Буди-киссу, баллы					
I	Очень чистые	Менее 1.00	1 - 20	10	Менее 0.5	Менее 0.5	Более $10^3$	Менее 0.3	>2
II	Чистые	1.00 - 1.50	21 - 35	7 - 9	0.5 - 1.0	0.5 - 5.0		0.3 - 1.0	>2
III	Умеренно загрязненные	1.51 - 2.50	36 - 50	5 - 6	1.1 - 3.0	5.1 - 10.0	$10^3 - 10^2$	1.0 - 2.5	>2
IV	Загрязненные	2.51 - 3.50	51 - 65	4	3.1 - 5.0	10.1 - 50.0	Менее $10^2$	2.5 - 4.0	1.0 - 2.0
V	Грязные	3.51 - 4.00	66 - 85	2 - 3	5.1 - 10.0	50.1 - 100.0		4.0 - 6.0	0 - 1.0
VI	Очень грязные	Более 4.00	86 - 100 или макробентос отсутствует	0 - 1	Более 10.0	Более 100.0		6.0 - 10.0	0

"Правила контроля качества воды водосливов и водотоков" [ГОСТ 17.1.3.07-82]



## Методы экологического мониторинга

### Физико-химические методы мониторинга

#### Оценка физико-химических факторов

1. Возможность непосредственного контроля источника загрязнения
2. Ясность в постановки задачи и интерпретации результатов мониторинга
3. Получение результатов в четких количественных единицах
4. Высокая точность измерения показателей
5. Возможность автоматизации процесса получения данных

### Биоиндикация

#### Оценка реакции биологических объектов

1. Возможность оценки воздействия неизученных, трудно-обнаружимых веществ или веществ, в данный момент не присутствующих в биоте.
2. Возможность оценки крайне малых доз веществ
3. Возможность оценки эффектов синергизма и антагонизма, комплекса факторов
4. Относительная дешевизна методов



**Биоиндикатор** - группа особей одного вида или сообщества, по наличию или по состоянию которых, а также по их поведению судят о естественных и антропогенных изменениях в среде (чувствительные и кумулятивные).

**Биологические переменные** – любой признак, свойство или функция организма (биоиндикатора), популяции, экосистемы

Уровни	Ступени		
	Молекулярно-клеточная	Организменная	Надорганизменная
Низший	Молекулы одного класса	Ткани	Популяции
Средний	Органоиды, клетки	Органы, их системы	Биоценоотические комплексы
Высший	Клетки	Организмы	Биоценозы

Чем ниже ранг биологической переменной, используемой в качестве биоиндикатора, тем более частными и специфичными могут быть выводы о воздействиях факторов среды, и наоборот.



Действие поражающего вещества (фактора)

Острое

Хроническое

Чувствительный  
биоиндикатор

Материальная  
кумуляция

Функциональная  
кумуляция

Кумулятивный  
биоиндикатор

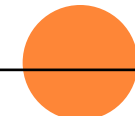




# Принципы выбора биоиндикаторов (биологических переменных)

1. Фундаментальность биологического воздействия
2. Эффективность биологических измерений
3. Экономическая целесообразность

<b>Фундаментальность биологического воздействия</b>	<b>Эффективность биологических измерений</b>
Существование связи между переменной и переменными роста, воспроизводства, выживаемости особей, популяции и экосистемы	Характер связи отклика переменной с действующим загрязнением
Характер связи между переменной и откликами на высшем и низшем уровнях	Интенсивность действующего фактора, вызывающего наблюдаемый отклик переменной
Специфичность отклика к фактору, его вызывавшему	Пределы изменения величины действующего фактора, вызывающие наблюдаемый эффект
Возможность возврата переменной к своему первоначальному значению после прекращения действия вызвавшего его фактора	Величина отрезка времени, в течение которого формируется отклик
	Легкость обнаружения превышения сигнала над природным фоном
	Точность измерения отклика



# Характер связи отклика переменной с действующим загрязнением

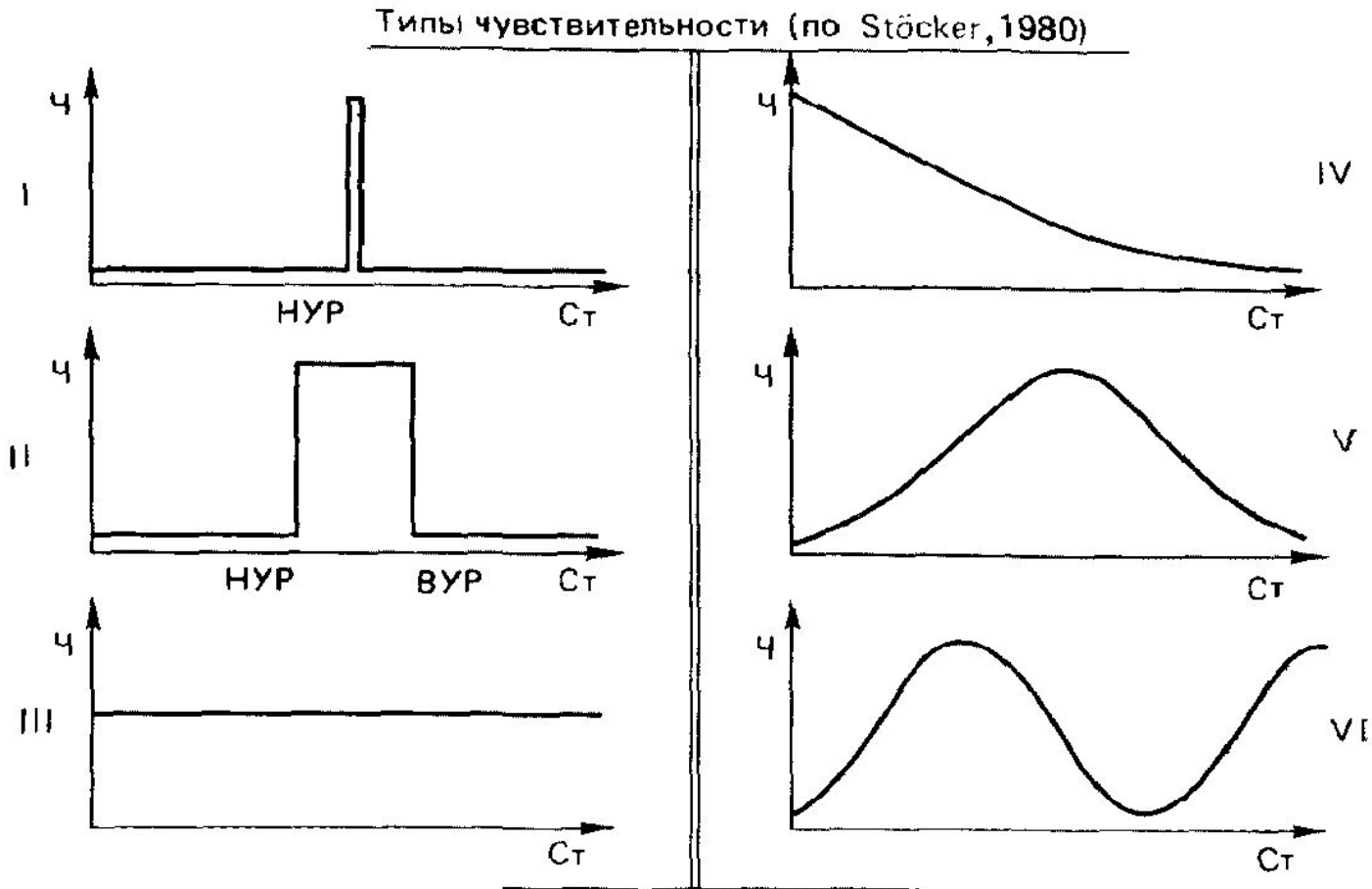


РИС. 1.4. Типы биоиндикации в зависимости от развития реакции во времени (по Stöcker из Schubert, 1984): НУР — ниже уровня реакции; ВУР — выше уровня реакции; Ст — стрессор; Ч — чувствительность

## Критерии отбора биоиндикаторов:

- быть типичным для данных условий;
- иметь высокую численность в исследуемом экотопе;
- обитать в данном месте в течение ряда лет, что даёт возможность проследить динамику загрязнения;
- находиться в условиях, удобных для отбора проб;
- давать возможность проводить прямые анализы без предварительного концентрирования проб;
- характеризоваться положительной корреляцией между концентрацией загрязняющих веществ в организме-индикаторе и объекте исследования;
- использоваться в естественных условиях его существования;
- иметь короткий период онтогенеза, чтобы была возможность отслеживания влияния фактора на последующие поколения.



## Организм и суборганизменные структуры

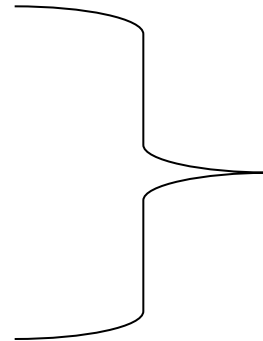
- химический состав клеток;
- состав, структура и степень функциональной активности ферментов;
- структурно-функциональные характеристики клеточных органоидов;
- размеры клеток, их морфологические характеристики, уровень активности;
- гистологические показатели;
- концентрации поллютантов в тканях и органах (кумулятивные биоиндикаторы);
- частота и характер мутаций, канцерогенеза, уродств;
- физиологические и анатомические показатели организма



# Оценка стабильности развития (гомеостаз) живых организмов

## Стабильность:

- Морфологическая
- Генетическая
- Физиологическая
- Биохимическая
- Иммунологическая

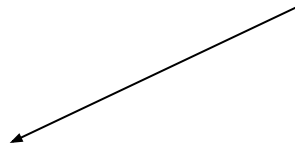


Фоновый мониторинг

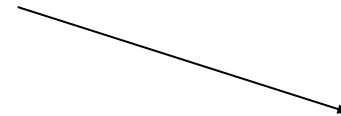


Локальный мониторинг

## Оценка стабильности морфологического развития (наиболее простой и оперативный подход)



Определение величины флюктуирующей асимметрии билатеральных морфологических признаков (Захаров и др., 2000).



Определение частоты появления фенотипических отклонений в развитии



### Статические характеристики (в момент времени t)

Численность (общее число особей в популяции)
Плотность (число особей в единице объема или на единице площади)
Биомасса (суммарная масса особей в единице объема или на единице площади)
Средняя масса особи (соотношение биомассы и плотности (простейшая характеристика размерно-весовой структуры))
Соотношение плотности особей разного пола (простейшая характеристика половой структуры популяции)
Показатели неравномерности пространственного распределения особей



## Динамические характеристики (за период времени $\Delta t = t_2 - t_1$ )

Скорость абсолютного изменения популяционной плотности и биомассы

Скорость относительного изменения популяционной плотности биомассы популяции

Удельная смертность и рождаемость

Реализуемая доля «биотического потенциала» вида (соотношение максимального значения рождаемости, реализуемого изучаемой популяцией, и «биотического потенциала» вида, т.е. максимального значения рождаемости, реализуемого данным видом в идеальных условиях)

Продукция популяции

Скорость продуцирования популяции



# Многовидовые биосистемы

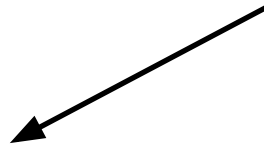
## Экосистемы



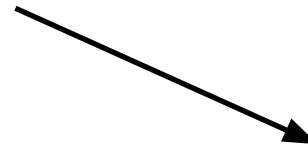
## Сообщества

(планктон, бентос, почвенная фауна, фитоценоз и др.)

## Биоиндикаторные показатели сообщества



**Структурные,  
статические**



**Функциональные,  
динамические**



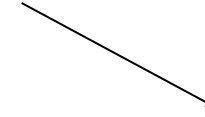
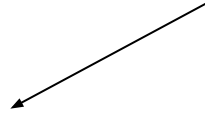


## Структурные и статические показатели сообщества

- **Видовое разнообразие** ( количество видов в сообществе);
- Показатели обилия (численность и биомасса);
- Соотношение суммарных показателей обилия:
  - видов (видовое разнообразие) или более крупных таксонов;
  - представителей разных стратегий питания (трофическая структура);
  - особей с разными размерами, массой (размерно-весовая структура);
  - видов с различными ценотическими стратегиями (например, *r*- и *K*-стратегов; виолентов, пациентов и эксплерентов);
  - видов с разной чувствительностью к воздействиям (эври- и стенобионтов);
  - видов с разным поведением.



# Функциональные и динамические показатели сообщества



## Эколого-физиологические показатели сообщества

Траты на обмен сообщества (или экосистемы)

$$R = \sum_{j=1}^N R_j$$

Первичная продукция

Вторичная продукция

Соотношения продукции,  
деструкции и биомассы

P/V и P/R-коэффициенты

## Показатели динамики статических характеристик сообщества

- изменение какой-либо статической характеристики  $X$  (плотности, биомассы сообщества, индексов разнообразия)  $\Delta X_{\Delta t} = X_2 - X_1$  за изучаемый период времени  $\Delta t = t_2 - t_1$ ;
- скорость абсолютного изменения значений статической характеристики  $dX/dt \approx (X_2 - X_1)\Delta t^{-1}$  в момент времени  $t$ ;
- скорость относительного изменения значений статической характеристики  $rX = (dX/dt)$

