



ИБВВ РАН



МЕТОДЫ БИОДИАГНОСТИКИ ПРИ ЭКОТОКСИКОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКЕ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ

Курс лекций

**Лекция 4
Биоиндикация**

Г.М. Чуйко

Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, Борок, Россия

Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова

gchuiko@mail.ru

Компоненты современной системы оценки антропогенного влияния на окружающую среду

Физико-химический анализ
(количественная и качественная оценка стресс-фактора)

Биодиагностика
(ответы биосистем на разных уровнях биологической организации)

Биомаркирование
(суборганизменный уровень)

Биотестирование
(уровень целого организма)

Биоиндикация
(надорганизменный уровень)

Аналитические физико-химические методы используются для качественной и количественной оценки антропогенных факторов окружающей среды методами физико-химического анализа, а биодиагностика – для оценки степени их воздействия на биоту по её реакциям на разных уровнях биологической организации.



В основе биоиндикации лежит принцип снижения видового разнообразия (упрощение биоценоза) и увеличение численности устойчивых видов при любых неблагоприятных изменениях в экосистеме (окружающей среде), включая антропогенное загрязнение.

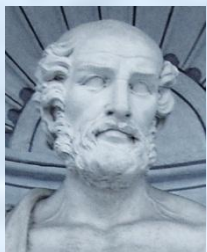
Методами биоиндикации определяется присутствие в окружающей среде того или иного типа загрязнения по наличию определенных организмов, наиболее чувствительных к изменению экологической обстановки, т. е. обнаружение и определение биологически значимых антропогенных нагрузок на основе реакции на них живых организмов, их популяций и сообществ.

Применение методов биоиндикации для оценки качества среды подразумевает выделение видов животных или растений и их сообществ, реагирующих на тот или иной тип воздействия.

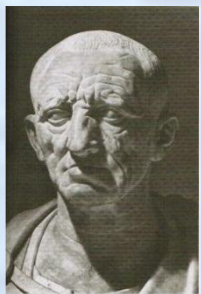
Биоиндикация в широком понимании – использование подходящих индикаторных организмов и изменений в их сообществах в определенных условиях с целью качественной и количественной оценки (без определения степени загрязнения) эффекта антропогенного и естественного влияния на окружающую среду.

Изначально биоиндикация стала формироваться как **фитобиоиндикация** еще в древнем мире в процессе развития сельскохозяйственного производства и растениеводства.

История развития биоиндикации



Теофраст (327-287 гг. до н.э.) – древнегреческий философ, естествоиспытатель написал известную работу "Природа растений", в которой содержится немало советов о том, как по характеру растительности судить о свойствах земель.



Марк Катон Старший (234-149 гг. до н.э.) – древнеримский политик и писатель; в своем трактате «Земледелие» он обращает внимание, что густота травостоя до перепашки помогает выбирать участки, пригодные для посева культур бобовых.



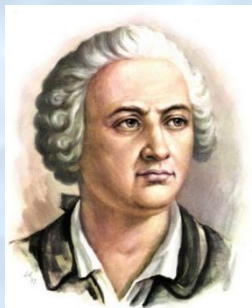
Плиний Старший (23 или 24-79 гг.) – римский ученый-эрудит и писатель; в его произведении «Естественная история» он пишет, что не всегда высокие деревья или пышные луга и высокие травы служат признаком плодородия почвы.



Колумелла (около 70 гг. н.э.) – один из первых древнеримских писателей и агроном, осветивший в своих произведениях тему сельского хозяйства. В своих трактатах «О сельском хозяйстве» и «О деревьях» он писал, что по листве деревьев, по травам или по уже поспевшим плодам можно судить о свойствах почвы и знать, что может хорошо на ней расти.



История развития биоиндикации в России



Ломоносов М.В. (1711-1765 гг.) – первый русский учёный-естествоиспытатель мирового значения, энциклопедист, химик, астроном, приборостроитель, географ, металлург, геолог, поэт, филолог, художник, историк и др. В своих трудах он упоминает о растениях, указателях особенностей почв, горных пород, подземных вод.



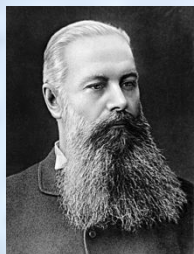
Докучаев В.В. (1749-1802 гг.) – российский прозаик, поэт, философ. Вслед за М.В. Ломоносовым пишет, что по виду растения можно судить о характере почв и горных пород, а также растения могут указывать на наличие подземных вод.



История развития биоиндикации в России



Карпинский А.П. (1847-1936 гг.) – русский геолог, академик, с 1917 года и до конца жизни первый выборный президент Российской академии наук (Академия наук СССР с июля 1925 года), основоположник биоиндикационного использования растений для оценки свойств почв и подстилающих горных пород по особенностям развития растений и составу растительного покрова. Он писал о возможности растительной биоиндикации и использовал характер распространения растений для составления геологических карт.



Докучаев В.В. (1846-1903 гг.) – русский ученый-геолог и почвовед, основоположник школы почвоведения и географии почв, создал учение о почве как о самостоятельном природном теле, открыл основные закономерности генезиса и распространения почв. В 1898 г. им был сформулирован закон постоянства взаимоотношений между почвой и обитающими на ней растительными организмами как во времени, так и в пространстве. Считал, что по комплексам почвенных животных можно определить типы почв и их изменение под влиянием хозяйственной деятельности человека.



Фитобиоиндикация обладает следующими достоинствами как метод оценки состояния окружающей среды:

- Высокая чувствительность – регистрируются уровни загрязнения воздуха в 3-5раз ниже санитарно-гигиенических ПДК;
- Позволяет определять уровни загрязнения воздуха на обширных территориях;
- Определять степень и опасность воздействия загрязнителей на экосистемы;
- Изучать характер антропогенной регрессии компонентов экосистем.

Примеры фитобиоиндикаторов присутствия в воздухе и почве различных видов загрязняющих веществ

Компоненты	Важнейшие древесные породы – индикаторы загрязнения	Культурные растения - индикаторы загрязняющих веществ
Диоксид серы	Ель европейская Пихта сибирская Сосна обыкновенная Ясень американский	Пшеница, ячмень, гречиха, люцерна, горох, клевер, хлопчатник, фиалка
Фтористый водород	Ель европейская Пихта сибирская Сосна обыкновенная	Абрикос, петрушка, гладиолус, тюльпан, нарцисс, рододендрон
Аммиак	Липа сердцелистная	Сельдерей, табак
Хлористый водород	Ель европейская Пихта кавказская Лиственница европейская Ольха клейкая Лещина обыкновенная	Фасоль обыкновенная, шпинат, редис, смородина, клубника
Озон	Сосна веймутова	Картофель, томаты, citrusовые
Тяжелые металлы	Вяз гладкий Боярышник обыкновенный	Овсяница, орхидеи

Примером фитобиоиндикации может служить использование специально выведенного для этой цели сорта табака, который очень восприимчив к содержанию озона в воздухе.

Даже при слабом повышении концентрации озона в воздухе уже через несколько дней по всей листовой пластинке (у молодых листьев только вблизи верхушки) густо образуются некротические пятна серебристого вида.

Часто для сравнения рядом одновременно высаживают относительно устойчивые к озону сорта.

Так же чувствительны к действию озона шпинат и виноград: некротические пятна, некроз верхней части листьев.

Другой пример фитобиоиндикации – высаживание индикаторных растений в промышленной зоне вокруг предприятий.

- **Липа весьма чувствительна к загрязнению почвы солями, попадающими сюда вместе с песком в зимний период.**
- **Показателем реакции является краевой хлороз на листьях. Поэтому по величине повреждения листовых пластинок липы можно судить о степени засоления газонов.**



История развития биоиндикации в гидробиологии в России

В гидробиологии понятие «биоиндикация» у нас в стране стало складываться в 60-е годы XX в. в ходе развития методов оценки влияния антропогенных и природных факторов на водные объекты в рамках нового научного направления «водная токсикология», ведущий вклад в формирование которого внес Строганов Николай Сергеевич (1902-1982) – известный ученый, гидробиолог, профессор МГУ им. Ломоносова, заслуженный деятель науки РСФСР.

К этому времени стало очевидным, что попадая в водный объект, загрязняющие вещества оказывают негативное влияние не только на уровне организма и отдельной особи, но и на уровне целых популяций и сообществ, меняя взаимоотношения между видами внутри них, что в конечном итоге сказывается на структурно-функциональных характеристиках водных экосистем. Причем, водные сообщества по-разному реагируют на различные типы загрязняющих веществ.

Из этого сформировалось понимание того, что реакции водных сообществ могут быть использованы для выявления загрязнения и оценки его влияния на водные объекты.

Биоиндикация – обнаружение и определение экологического значения антропогенных нагрузок на водный объект на основе определения качественных (видовой состав) и количественных (численность, биомасса, видовое разнообразие) характеристик различных биоценозов гидробионтов (Никаноров, Иваник, 2014).

В качестве биоиндикаторов выступают отдельные таксоны, экологические группировки (например, в водной среде – фитопланктон, зоопланктон, макрозообентос, перифитон и т.д.), физиологически сходные организмы (например, имеющие одинаковый тип питания), размерные группы.

Отклонение индикаторной биотической характеристики от некоторой заданной нормы свидетельствует о превышении уровней допустимого воздействия абиотических факторов.



Биоиндикационные методы оценки – это характеристика состояния водной экосистемы по растительному и животному населению водоема. Рассматриваются различные типы населения водоемов – перифитон, бентос, планктон, нектон, макрофиты и др.

Специалисты многих стран при мониторинге рек используют бентосных макробеспозвоночных для оценки влияния на качество воды ряда антропогенных загрязнений.

Классификация с использованием бентосных макробеспозвоночных не дает полную экологическую картину всех искусственных и естественных загрязнений, которые встречаются в проточных водах. Не имеется также никакой единой классификации рек, которая пригодна для всех географических областей. Однако для рек, которые пересекают национальные границы, потребность в классификации имеется.

Сущность классификации рек Международной организации по стандартизации (ИСО) заключается в сравнении между поведением бентосных макробеспозвоночных в чистых условиях и в наблюдаемой среде. По ИСО рекомендуется пять классов качества вод по бентосным макробеспозвоночным.

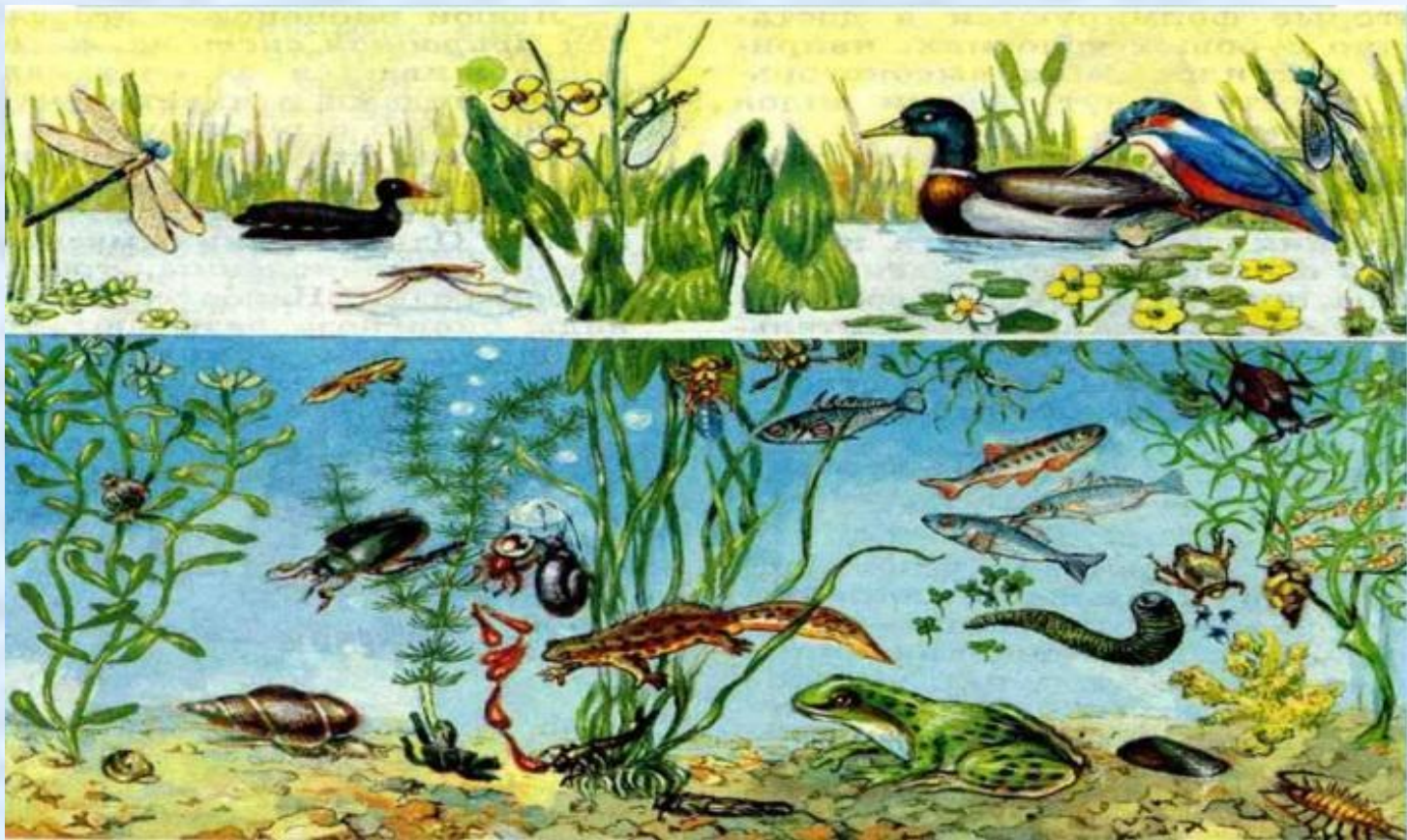
При этом типе классификации принимают во внимание естественную изменчивость биологических сообществ.

Биологическая классификация водных объектов

Классификация качества по бентосным макробеспозвоночным	Характеристика
Высокое	Естественное поведение бентосных макробеспозвоночных
Хорошее	Не пострадавшее биологическое сообщество
Посредственное	Несколько пострадавшее биологическое сообщество
Бедное	Умеренно пострадавшее биологическое сообщество
Плохое	Сильно пострадавшее биологическое сообщество – экстремальная реакция на антропогенное загрязнение.

В качестве биоиндикаторов качества водной среды, состояния гидроэкосистем и их антропогенных изменений могут использоваться практически любые гидробионты, их популяции и сообщества.

Результативность биоиндикации определяется при этом соответствием ее целей особенностям выбранного индикатора.



Биоценоз пресноводного пруда

Загрязнение водной среды

```
graph TD; A[Загрязнение водной среды] --> B[Органические нетоксические вещества]; A --> C[Органические и минеральные токсические вещества]; B --> D[Сапробность]; C --> E[Токсобность];
```

**Органические
нетоксические вещества**

Сапробность

**Органические и
минеральные токсические
вещества**

Токсобность

САПРОБНОСТЬ (от греч. *sapros* — гнилой) способность организмов обитать в воде с тем или иным содержанием органических веществ, поступающих в водоёмы преимущественно с хозяйственно-бытовыми и агропромышленными сточными водами.

По степени уменьшения загрязнённости вод органическими веществами их делят на поли-, мезо- и олигосапробные, а организмы, в них обитающие, называют соответственно поли-, мезо- и олигосапробами.

Состав и количество сапробионтов, структура их специфических сообществ служат критериями для оценки степени загрязнённости водоёмов органическими веществами, т. е. их используют при биоиндикации качества вод, их биологической полноценности.

Увеличение *S.* способствует эвтрофикации водоёмов.

Способность сапробионтов минерализовать органические вещества используют для биологической очистки сточных вод.

Сапробность является функцией потребностей организма в органическом питании и устойчивости к возникающим при разложении органических соединений ядовитых веществ: H_2S , CO_2 , NH_3 , H^+ , органических кислот и др.

Полисапробная зона – содержит много нестойких органических веществ и продуктов их анаэробного разложения. Фотосинтеза нет. Дефицит растворенного O_2 , полностью идет на окисление. В воде – сероводород и метан. На дне много детрита, идут восстановительные процессы; железо в форме FeS . Ил черный с запахом сероводорода. Много сапробной микрофлоры, гетеротрофных организмов: нитчатые и серные бактерии, бактериальные зооглеи; простейшие – инфузории, жгутиковые, олигохеты, водоросль *Polutoma*.

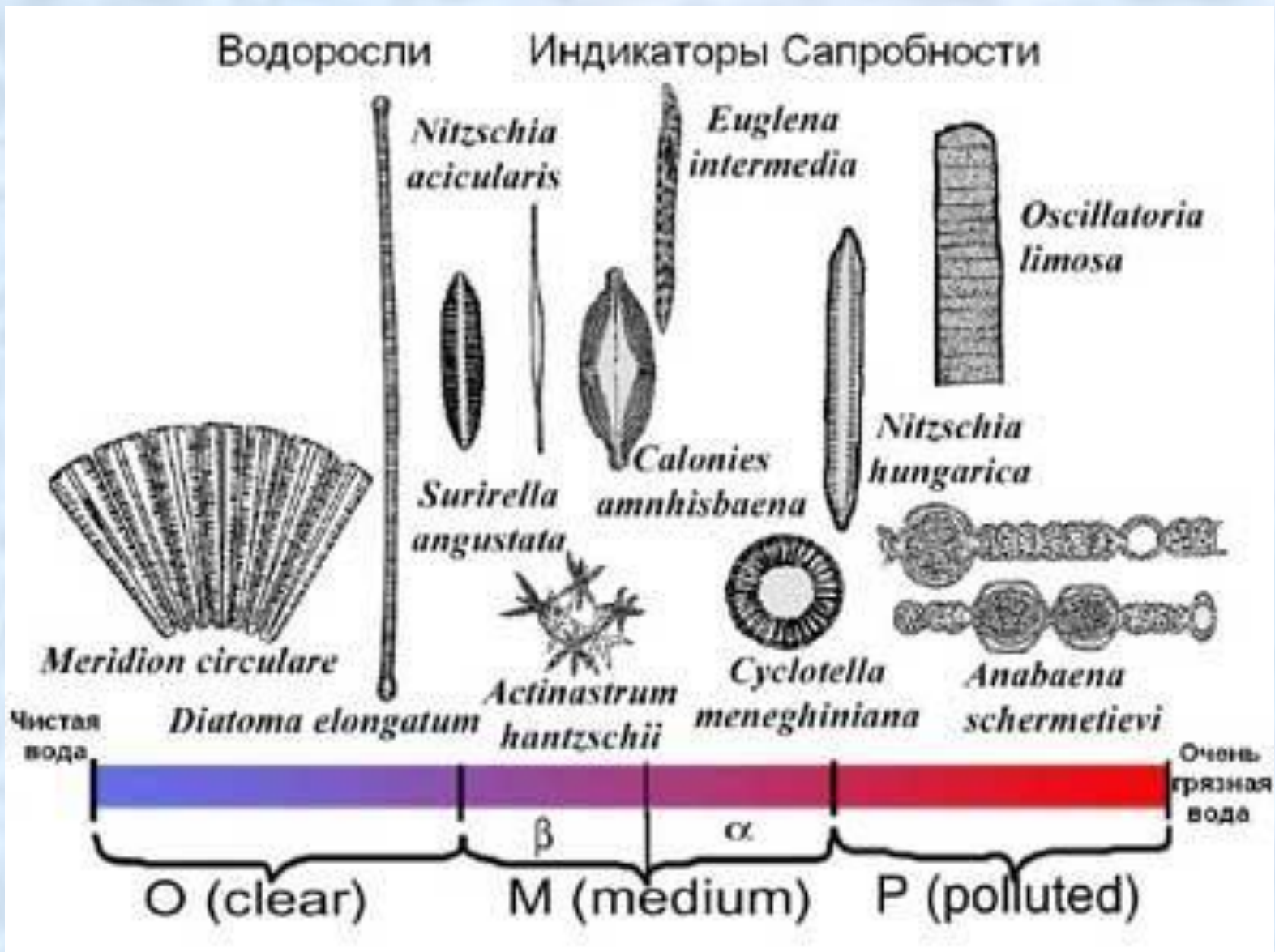
Альфа-мезосапробная – начинается аэробный распад органических веществ, образуется аммиак, CO_2 , мало O_2 , сероводорода, метана – нет. Железо в форме закиси и окиси. Идут окислительно-восстановительные процессы. Ил серого цвета. Преобладают бактериальные зооглеи, эвглена, хламидомонада, личинки хиромонид.

Бета-мезосапробная – произошла минерализация. Увеличивается число сапрофитов. Содержание O_2 колеблется в зависимости от времени суток. Ил желтый, идут окислительные процессы. Много детрита, цветение воды (фитопланктон), диатомовые и зеленые водоросли, роголистник. Много корненожек, инфузорий, червей, моллюсков, личинок хиромонид. Есть ракообразные, рыбы, но численность их невелика.

Олигосапробная – чистые водоемы. Цветения не бывает, содержание O_2 и CO_2 не колеблется. Детрита мало. Бентос малочисленен. Встречаются водоросли рода *Melozira*, коловратки, дафнии, личинки веснянок, поденок, моллюски, стерлядь и т.д.

Установлено, что фактически в ряду олигосапробы – мезосапробы – полисапробы у гидробионтов возрастают не только специфическая стойкость к органическим загрязняющим веществам и к таким их последствиям, как дефицит кислорода, но и их **эврибионтность**, т. е. способность существовать при различных условиях среды.

Водоросли-индикаторы сапробности



БИОИНДИКАЦИЯ КАЧЕСТВА ПРИРОДНЫХ ВОД



В водоёмах **спиругира** образует плавающие на поверхности воды скопления, напоминающие внешним видом жёлто-зелёные мочалки.



Азотные удобрения рекомендуется вносить поздней осенью или ранней весной, так как талые воды смывают половину удобрений. Один из признаков загрязнения водоёма, цветение воды, вызванное буйным размножением водорослей.

СПИРОГИРА - индикатор поступления в водоём биогенов, особенно азота

Эвтрофикация

Словарь



Эвтрофикация (др.-греч. εὖ τροφία — хорошее питание) — обогащение рек, озёр и морей биогенами, сопровождающееся повышением продуктивности растительности в водоёмах.

Эвтрофикация может быть результатом как естественного старения водоёма, так и антропогенных воздействий. Основные химические элементы, способствующие эвтрофикации — фосфор и азот.

Примеры цветения воды



Воткинский и Ижевский пруды



Рыбинское, Горьковское и Чебоксарское водохранилища

Биоиндикация воды по состоянию популяции ряски малой



ТОКСОБНОСТЬ (от греч. *toxikon* — яд), способность организмов существовать в водах, содержащих токсичные вещества минерального или органического происхождения.

Рост промышленности вызвал необходимость создания системы биологической оценки качества вод не только по загрязнению их природными органическими веществами (сапробность), но и токсическими веществами промышленных и других стоков.

В зависимости от степени загрязнения водоёмов токсическими веществами различают поли-, мезо- и олиготоксобную зоны, заселяемые организмами, выносящими соответственно сильную, среднюю и слабую степень токсичности загрязнения водоёмов.

Водоёмы или их зоны, которые загрязнены настолько, что гидробионты в них полностью отсутствуют, называются гипертоксобными.

Бальная оценочная шкала для оценки ухудшения среды обитания при биоиндикации

Степень нарушения экосистемы, баллы	Степень ухудшения среды обитания	Отклонение от фоновых значений индикаторного показателя, %
I	Очень слабая	≤ 20
II	Слабая	>20 , но ≤ 40
III	Средняя	>40 , но ≤ 60
IV	Сильная	>60 , но ≤ 80
V	Очень сильная	>80

В гидробиологии в настоящее время для оценки состояния окружающей среды и степени нарушенности водных биоценозов, а также для оценки сапробности воды по сообществам гидробионтов используются **биотические индексы**:

- Индекс Майера
- Индекс Сёренсена
- Интегральный (сапробность и токсобность) индекс Балушкиной
- Индекс Вудивиса
- Индекс Шеннона-Уивера (информационный)
- Индекс сапробности Пантле-Бука
- Индекс сапробности Пареле
- Индекс Гуднайта-Уитлея
- Индекс Бека

Индекс Майера – наиболее простой метод биоиндикации (биотический индекс). Использование этого индекса с целью оценки состояния качества воды подходит для любых типов водоемов. Метод прост и имеет преимущество – не требуется определять беспозвоночных с точностью до вида. Метод основан на том, что различные группы водных беспозвоночных приурочены к водным объектам с определенной степенью загрязненности. При этом организмы-индикаторы относят к одной из трех следующих групп:

Обитатели чистых вод, X	Обитатели слабо загрязненных вод, Y	Обитатели грязных вод, Z
Личинки веснянок	Бокоплав	Личинки комаров-звонцов (хируномиды)
Личинки поденок	Речной рак	Пиявки
Личинки ручейников	Личинки стрекоз	Водяной ослик
Личинки вислокрылок	Личинки комаров-долгоножек	Моллюски-прудовики
Двустворчатые моллюски	Моллюски-катушки	Личинки мошки
	Моллюски-живородки	Малощетинковые черви (олигохеты)

Обитатели более высоких по степени загрязнения вод могут обитать в более чистых водах, а наоборот – нет.

Обитатели чистых вод



Личинка веснянки



Личинка поденки



Личинка ручейника



Личинка вислокрылки



Моллюск анодонта



Моллюск дрейссена

Обитатели слабозагрязненных вод



Бокоплав



Личинки комаров-долгоножек



Личинки стрекоз



Моллюск катушка



Моллюск живородка



Речной рак

Обитатели загрязненных вод



Водяной ослик



Личинка комаров-звонцов (хирономиды)



Личинка мошки



Моллюск прудовик



Олигохеты (трубочник)



Пиявки

Индекс Майера

Нужно отметить, какие из приведенных в таблице групп обнаружены в пробах. Количество найденных групп из первого раздела необходимо умножить на 3, количество групп из второго раздела – на 2, а из третьего раздела – на 1. Получившиеся цифры складывают:

$$X*3+Y*2+Z*1 = S$$

Класс качества	S, баллы	Уровень загрязнения воды
1	≥ 22	Чистая
2	17-21	Условно чистая
3	11-16	Умеренно загрязненная
4-7	≤ 10	Грязная

Индекс Майера

Простота и универсальность метода Майера дают возможность быстро оценить состояние исследуемого водоема. Точность метода невысока. Но если проводить исследования качества воды регулярно в течение какого-то времени и сравнивать полученные результаты, можно уловить, в какую сторону изменяется состояние водоема.

Индекс Сёренсена

Этот показатель характеризует изменения видового состава сообществ более адекватно, чем остальные известные коэффициенты видового сходства, и успешно используется при биоиндикационных исследованиях макрозообентоса.

$$K_s = 2j / a + b,$$

где a и b - количество видов в двух сравниваемых сообществах, j - количество видов, общих для обоих сообществ.

Количественными характеристиками видового состава макрозообентоса и других сообществ является показатель видового богатства, т.е. общее количество видов, входящих в сообщество.

Недостаток: требуется определение макрозообентоса до вида для чего необходим специалист соответствующей квалификации.

Индекс Вудивиса (индекс р. Трент)

Выясняют, какие индикаторные группы есть в водоеме. К индикаторным относятся: личинки веснянок, поденок, ручейников, рачки бокоплав, равноногие раки, трубчатники, личинки хирономид.

Оценивают общее разнообразие донных беспозвоночных, подсчитывают число групп, под группой понимают:

1. любой вид плоских червей,
2. класс малощетинковых червей (кроме р. *Nais*),
3. р. *Nais*,
4. любой вид моллюсков, пиявок, ракообразных, водных клещей,
5. любой вид веснянок, перепончатокрылых жуков,
6. любой вид поденок, кроме *Baetis rodani*,
7. любое семейство ручейников,
8. семейство комаров звонцов, кроме видов р. *Chironomus sp.*,
9. личинки *Chironomus sp.*,
10. личинки мошек Simuliidae,
11. каждый известный вид личинок других летающих насекомых.

Определительная таблица расчета индекса Вудивисса

Индикаторные группы	> 1 Вида 1 Вид	Общее количество групп									
		0-1	2-5	6-10	11-15	16-20	21-25	26-30	31-35	36-40	>40
Plecoptera Личинки веснянок	> 1 Вида 1 Вид	- -	7 6	8 7	9 8	10 9	11 10	12 13	13 12	14 13	15 14
Ephemeroptera Личинки поденок *	> 1 Вида 1 Вид	- -	6 5	7 6	8 7	9 8	10 9	11 10	12 11	13 12	14 13
Trechoptera Личинки ручейников		- 4	5 4	6 5	7 6	8 7	9 8	10 9	11 10	12 11	13 12
Gammarus Бокоплавы		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Isopoda Равноногие раки		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Только трубочник (Tubifex) или личинки комаров (Chironomidae)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Все данные группы отсутствуют		0	1	2	-	-	-	-	-	-	-

* кроме вида *Baetis rhodani*

Индекс Вудивиса

Находят индекс водоема по таблице на пересечении значения общего количества групп и индикаторной группы, начиная сверху с личинок веснянок.

Определяют степень загрязнения водоема:

Баллы	Степень загрязнения
0 до 2	сильное
3 - 5	среднее
6 - 7	незначительное
8 - 10	чистый

Индекс Вудивиса

Многие исследователи, сравнивая разные системы мониторинга по зообентосу, пришли к выводу, что метод Ф. Вудивисса заслуживает большего внимания, чем остальные, и считают его "классическим". Но опыт применения его в нашей стране и за рубежом показал, что, будучи разработан для малых рек Англии, он применим далеко не ко всем типам водоемов; в частности, он дает неудовлетворительные результаты на крупных равнинных водохранилищах.

Ряд исследователей к недостаткам метода относит недостаточную корреляцию группы с численностью входящих в нее животных, вследствие чего завышается значение очень малочисленных групп.

Индекс Шеннона-Уивера (информационный) (Shannon, Weaver, 1963)

Особенно широкое применение в различных областях науки нашёл информационный индекс **Шеннона (H)**, обладающий наиболее простой и логичной структурой.

В экологии этот показатель используется для оценки видового разнообразия сообществ по плотности популяций (H_N) или, реже, по биомассе (H_B) и называется индексом разнообразия **Шеннона-Уивера** :

$$H_N = -\sum_{i=1}^k (p_i \log_2 p_i),$$

где $p_i = n_i / N$ – доля особей i – го вида, n_i – показатель обилия i – го вида, N – общий показатель обилия всех k видов в выборке.

Индекс Шеннона-Уивера (информационный) (Shannon, Weaver, 1963)

Ухудшение качества водной среды приводит к уменьшению количества видов в сообществах (за счет исчезновения стенобионтов) и нарушает выравненность значений их популяционной плотности.

Поэтому значения индекса Шеннона-Уивера и прочих индексов разнообразия сообществ макрозообентоса обычно находятся в обратной зависимости от уровня антропогенного воздействия на гидроэкосистему

Значения индекса обычно меняются в пределах от 1.5 до 3.5, что соответствует изменению категории качества воды от грязной к чистой.

Еще в начале XX века была предложена первая шкала оценки степени загрязненности водоемов, основанная на учете присутствия в сообществах гидробионтов индикаторных видов, чьи требования к качеству среды более или менее известны (Kolkwitz, Marsson, 1908, 1909).

В основу шкалирования сапробности положен принцип, отражающий степень оксифильности гидробионтов–индикаторов. Водоемы и отдельные участки их акватории классифицируются по степени загрязненности органическими веществами следующим образом (ГОСТ 17.1.3.07–82):

Зона сапробности	Класс чистоты	Характеристика воды
ксеносапробная	I	очень чистая
олигосапробная	II	чистая
β-мезосапробная зона	III	слабо (умеренно) загрязненная
α-мезосапробная	IV	загрязненная
полисапробная	V	грязная
гиперсапробная	VI	очень грязная

Индекс сапробности Пантле-Бука (R. Pantle, H. Buck, 1955)

В системе Роскомгидромета для оценки сапробности воды по организмам перифитона и макрозообентоса рекомендуется применять метод индикаторных организмов Пантле и Бука в модификации Сладечека.

Данный метод учитывает относительную частоту встречаемости (обилие) гидробионтов h и их индикаторную значимость s (сапробную валентность).

Обе величины (h и s) входят в формулу для вычисления индекса сапробности.

$$S = \frac{\sum(sh)}{\sum h}$$

Индекс сапробности Пантле-Бука (R. Pantle, H. Buck, 1955)

Индикаторную значимость s и зону сапробности определяют для каждого вида по спискам сапробных организмов.

Величина h находится из шестиступенчатой шкалы значений частоты и определяет относительное обилие видов:

Соотношение значений относительного обилия и частоты встречаемости организмов

Встречаемость	Количество экземпляров одного вида, % от общего количества организмов	h , баллы
Очень редко	<1	1
Редко	2-3	2
Нередко	4-10	3
Часто	10-20	5
Очень часто	20-40	7
Масса	40-100	9

Для статистической достоверности результатов исследования необходимо, чтобы в пробе содержалось не менее 12 индикаторных видов с общей суммой частоты встречаемости (обилия) $\sum h$, равной 30.

Индекс сапробности Пантле-Бука

Индекс сапробности указывают с точностью до 0,01.

Для разных зон сапробности он находится в пределах;

ксеносапробной — 0-0,50;

олигосапробной — 0,51-1,50;

β -мезосапробной — 1,51-2,50;

α -мезосапробной — 2,51-3,50;

полисапробной — 3,51-4,00.

Наряду с зонами сапробности, устанавливаемыми для водных объектов на основе сапробиологического анализа, существуют зоны повышенной трофности, зоны обеднения, частичной или полной деградации исходных биоценозов, мертвые зоны и др.

Выявление и описание зон возможно при использовании других формальных методов, а также абсолютных биологических данных о видовом составе и структуре перифитонных сообществ.

Индекс Бека (Beck, 1955)

Автор выделил 39 видов многоклеточных беспозвоночных, являющихся индикаторами загрязнения, и все организмы разделил на две группы:

- выносящие только очень слабое загрязнение;
- способные переносить анаэробные условия.

Им предложена формула для нахождения биотического индекса, характеризующего степень загрязнения водоема органическим веществом:

$$I = 2(n \text{ видов 1-й группы}) + (n \text{ видов 2-й группы}).$$

При сильном загрязнении, когда индикаторных организмов на станции не обнаружено, индекс равен нулю, а при среднем загрязнении – варьирует от 1 до 6. В чистой реке с однообразными условиями и медленным течением индекс может принимать значение от 4 до 9, достигая своего максимального значения в наиболее чистых водах – 40.

Индекс Бика (Beack, 1955)

Бика [Beack, 1959Б, 1964Б] к разработке двух индексов – озерного и речного. При этом гидрофауна делится на три группы:

- виды очень устойчивые к загрязнению и встречающиеся на загрязненных участках в массовых количествах (1 балл);
- виды, встречающиеся как на загрязненных, так и на чистых участках, но не образующие больших скоплений (2 балла);
- виды неустойчивые к загрязнению (3 балла).

Незагрязненная станция должна иметь полный набор представителей трех групп, обычных для данного типа местообитания, и оценивается суммой трех баллов $1 + 2 + 3 = 6$. По мере развития загрязнения происходит исчезновение отдельных видов, при этом сумма оценочных баллов снижается, достигая в минимуме 0.

Методы оценки качества вод, основанные на применении отдельных крупных таксонов зообентоса

Метод крупных таксонов широко применяется в практике гидробиологического мониторинга благодаря простоте вычислений и отсутствию трудоемких таксономических определений. Теоретическим обоснованием и условием универсальности метода является повсеместное распространение используемых таксонов в водоемах разных типов с разным уровнем загрязнения. Такими группами являются олигохеты и личинки хирономид.

Олигохетный индекс Гуднайта -Уитлея

Классический вариант олигохетного индекса (ОИ) впервые был предложен Гуднайтом и Уитлеем в 1961 г.

ОИ рассчитывается как отношение численности олигохет (n_0) к общей численности организмов в пробе (N).

$$\text{ОИ} = n_0/N$$

При этом состояние реки считается:

хорошим при $\text{ОИ} < 60\%$,

сомнительным при $\text{ОИ} 60\text{-}80\%$,

сильно загрязненным, если $\text{ОИ} > 80\%$.

Олигохетный индекс Пареле

Основан на отношении численности олигохет семейства тубифицид к суммарной численности всех олигохет:

$$D_2 = t/O$$

где t — численность тубифицид (Tubificidae), O — численность всех олигохет.

По значениям D_2 были выделены:

- сильно загрязненные воды (0,8-1,0);
- загрязненные (0,55-0,79);
- слабо загрязненные (0,3-0,54);
- относительно чистые (меньше 0,3).

В малых быстротекущих водотоках с разнообразной донной фауной предлагается использовать коэффициент D_1 — соотношение численности тубифицид и всего бентоса в пробе.

Информационный индекс сапробности I_s

Предложен Для оценки состояния внутренних вод Европейского Севера

$$I_s = (N_t + N_h + N_f) / N_o$$

где I_s — индекс сапробности олигохет; N_t — средняя численность *Tubifex tubifex*, N_h — средняя численность *Limnodrilus hoffmeisteri*, N_f — средняя численность *Spirosperma ferox*; N_o — средняя численность всех олигохет в биотопе.

Значения характеризуют загрязненность вод следующим образом:

- сильно загрязненные воды (0,9-1,0);
- загрязненные воды (0,5-0,89);
- слабо загрязненные воды (0,3-0,49);
- чистые и относительно чистые воды (<0,3).

Индекс Балушкиной или метод крупных таксонов макрозообентоса

Метод крупных таксонов широко применяется в практике гидробиологического мониторинга благодаря простоте вычислений, отсутствию трудоемких таксономических определений.

Теоретическим обоснованием и условием универсальности метода является повсеместное распространение используемых таксонов в водоемах разных типов с разным уровнем загрязнения. Такими группами являются олигохеты и личинки хирономид.

Олигохетный индекс Гуднайта - Уитлея

Классический вариант олигохетного индекса (ОИ) впервые был предложен Гуднайтом и Уитлеем в 1961 г.

ОИ рассчитывается как отношение численности олигохет (n_0) к общей численности организмов в пробе (N).

$$\text{ОИ} = n_0/N$$

При этом состояние реки считается:

хорошим при $\text{ОИ} < 60\%$,

сомнительным при $\text{ОИ} 60-80\%$,

сильно загрязненным, если $\text{ОИ} > 80\%$.

Влияние относительной численности особей подсемейства Chironominae снижено вдвое на том основании, что в наиболее чистых водах относительная численность Orthocladiinae + Diamesinae приближалась к 100% (без учета зарослевых форм), а в наиболее грязных относительная численность Tanypodinae также составляла 100%.

Тенденция же увеличения относительного количества Chironominae по мере загрязнения выражена в меньшей степени и их индикаторное значение в целом ниже, что и нашло отражение в уменьшении.

Значения индекса К характеризуют:

Баллы	Степень загрязнения
0.136 - 1.08	чистые воды
1.08-6.5	умеренно загрязненные
6.5-9.0	загрязненные
9.0-11	грязные

Для оценки качества вод возможно использование любых других экспрессных методов, разработанных для отдельных регионов или водоемов.

Так, например, отсутствие олигохет позволяет отнести средний участок р. Ангары к особо чистому классу вод. Если в пробе появляются олигохеты, рассматривается соотношение обилия гаммарид и олигохет. Если гаммарид больше, чем олигохет, это I класс вод. Далее сравнивается соотношение обилия Naididae, *Tubifex tubifex* и *Limnodrilus*. Если Naididae больше, чем *T. tubifex* + *Limnodrilus*, вода относится ко II классу, если суммарное обилие *T. tubifex* и *Limnodrilus* равно или более 90% от общего обилия организмов — это III класс. Если в пробе присутствуют одни олигохеты — это IV класс вод.

Использование различных региональных методов возможно в качестве вспомогательных методов оценок состояния контролируемых водных экосистем и должно сопровождаться обязательным обоснованием их применения (ссылки на литературные источники, многолетние данные собственных наблюдений и др.).

Олигохетный индекс Гуднайта - Уитлея

Классический вариант олигохетного индекса (ОИ) впервые был предложен Гуднайтом и Уитлеем в 1961 г.

ОИ рассчитывается как отношение численности олигохет (n_0) к общей численности организмов в пробе (N).

$$\text{ОИ} = n_0/N$$

При этом состояние реки считается:

хорошим при $\text{ОИ} < 60\%$,

сомнительным при $\text{ОИ} 60-80\%$,

сильно загрязненным, если $\text{ОИ} > 80\%$.

Оценка состояния качества вод по фитопланктону

При оценке состояния водных экосистем важно учитывать одновременно функциональные и структурные характеристики фитопланктоценозов. Одновременное увеличение первичной продукции и видового разнообразия фитопланктона является надежным показателем экологического прогресса. Это явление часто наблюдается в местах смешения водных масс различного происхождения. С экологическим прогрессом обычно связано также образование водохранилищ. В первые десятилетия существования водохранилища увеличение первичной продукции может сопровождаться многократным увеличением таксономического разнообразия фитопланктона.

Оценка состояния качества вод по фитопланктону

При значительных уровнях антропогенных нагрузок, ведущих к увеличению первичной продукции, происходит сокращение видового разнообразия фитоценоза — метаболический прогресс достигается путем экологического регресса фитоценоза. На тяжелое загрязнение биогидроценоза указывает явление экологического и метаболического регресса фитопланктоценоза.

Оценка состояния экосистемы по показателям развития бактериопланктона

Данные об общем количестве бактерий (А), числе гетеротрофов (Б) и их соотношении позволяют охарактеризовать состояние экосистемы:

Оценка состояния экосистемы по шкале экологических модификаций

Состояние экосистемы	А, млн. клеток / мл	Б, тыс. клеток / мл	А / Б
Фоновое	<1,0	<0,5	>1000
Экологический прогресс (антропогенное экологическое напряжение)	1,0-4,0	0,5-10,0	1000-400
Элементы экологического регресса	4,0-20,0	10,0-200,0	400-100
Экологический регресс	20,0-40,0	100-70	100-70
Метаболический регресс	>40,0	>700,0	<70

Численность бактерий, вырастающих на МПА:10, характеризует определенный уровень трофности и загрязненности вод: в высокотрофных или загрязненных водах отношение числа таких бактерий к их количеству на МПА равно 2-3, в малотрофных и загрязненных водных объектах это отношение составляет 10-100 и может достигать еще больших значений.

Содержание споровых микроорганизмов указывает на характер органического вещества: при наличии трудноразлагаемых соединений число таких микроорганизмов может превышать 1000 клеток / мл.

Появление в пробах воды сульфатредуцирующих бактерий (в количестве нескольких десятков в 1 мл) свидетельствует об опасности сероводородного заражения.

Наличие фенол- и углеводородокисляющих бактерий в количествах, превышающих 10^2 - 10^3 клеток/мл, указывает на ту или иную степень загрязнения этими веществами.

Определение класса качества вод по биотическим индексам

С помощью классификатора качества вод Росгидромета на основе полученных индексов для разных групп гидробионтов проводится суммарная оценка качества по 6-балльной шкале:

Класс качества воды	Степень загрязненности воды	По фитопланктону, зоопланктону, перифитону	По зообентосу		По бактериопланктону		
		Индекс сапробности по Пантле и Букку (в модификации Сладечека), баллы	Отношение общей численности олигохет к общей численности донных организмов, %	Биотический индекс по Вудивиссу, баллы	Общее количество бактерий, 10^6 кл/см ³ (кл/мл)	Количество сапрофитных бактерий, 10^3 кл/см ³ (кл/мл)	Отношение общего количества бактерий к количеству сапрофитных бактерий
1	Очень чистые	Менее 1,00	1-20	10	Менее 0,5	Менее 0,5	Более 10^3
2	Чистые	1,00-1,50	21-35	7-9	0,5-1,0	0,5-5,0	Более 10^3
3	Умеренно загрязненные	1,51-2,50	36-50	5-6	1,1-3,0	5,1-10,0	10^3 - 10^2
4	Загрязненные	2,51-3,50	51-65	4	3,1-5,0	10,1-50,0	Менее 10^2
5	Грязные	3,51-4,00	66-85	2-3	5,1-10,0	50,1-100,0	Менее 10^2
6	Очень грязные	Более 4,00	86-100 или макробентос отсутствует	0-1	Более 10,0	Более 100,0	Менее 10^2