



Дисциплина
**«БИОЛОГИЧЕСКИЙ
МОНИТОРИНГ»**

Лекция № 7. Особенности
биоиндикации поверхностных вод

Особенности биоиндикации водных экосистем

Цель биоиндикации вод – установление качества воды

Качество воды:

- характеристика состава и свойств воды, определяющая пригодность ее для конкретных видов водопользования.
- интегральный фактор абиотической среды, определяющий устойчивость развития и степень деградации отдельных гидробиологических компонентов экологической системы.

Критерий качества	Определение
Экологический	Учитывает условия нормального во времени функционирования водной экологической системы
Экономический	Учитывает рентабельность использования воды водного объекта
Гигиенический	Учитывает токсикологическую, эпидемиологическую и радиоактивную безопасность воды и наличие благоприятных свойств для здоровья живущего и последующих поколений людей
Рыбохозяйственный	Учитывает пригодность ее для обитания и развития промысловых рыб и промысловых водных организмов



Класс качества воды – уровень качества, устанавливаемый в интервале числовых значений свойств и состава воды, характеризующих ее пригодность для конкретного вида водопользования

Индекс качества – обобщенная числовая оценка качества воды по совокупности основных показателей для конкретных видов использования.

Классы качества воды по ГОСТ 17.1.3.07-82

Класс чистоты	Определение
I	Очень чистая
II	Чистая
III	Умеренно-загрязненная
IV	Загрязненная
V	Грязная
VI	Очень грязная

Нормирование гидрохимических и гидробиологических показателей относительно градаций классов качества воды.



Классификации поверхностных вод по физико-химическим показателям

Таблица 3.8

Химические показатели состояния водоемов

Степень загрязнения	Растворенный кислород			БПК ₅ , в мг/л	Окисляемость, в мг/л O ₂	Аммонийный азот, в мг/л	Токсичные вещества в долях ПДК	Радиоактивность общая в долях норматива
	в мг/л		% насыщения					
	Лето	Зима						
Очень чистые	9	14—13	95	0.5—1.0	1	0.05	0	0.1
Чистые	8	12—11	80	1.1—1.9	2	0.1	0.1—0.9	0.1
Умеренно загрязненные	7—6	10—9	70	2.0—2.9	3	0.2—0.3	1.0—5.9	1.0
Загрязненные	5—4	5—4	60	3.0—3.9	4	0.4—1.0	6.0—10.9	10
Грязные	3—2	5—1—0	30	4.0—10.0	5—15	1.1—3.0	11.0—20.0	100
Очень грязные	0	0	0	>10	>15	>3	>20	1000

Примечание: Окисляемость относится к рекам с цветностью воды не более 30°

Таблица 3.10

Показатели состояния водоемов по физическим и органолептическим свойствам

Степень загрязнения	Взвешенные вещества мг/л	Прозрачность		Запах, в баллах	Нефть		pH
		по Секки, в м	по Снеллену, в см		в баллах	в мг/л	
Очень чистые	1—3	>2	>30	1	0	0.00	6.5—8.0
Чистые	4—10	2—1	30—20	2	1	0.1—0.2	6.5—8.5
Умеренно загрязненные	11—19	1—0.3	19—3.0	3	2	0.3	6.0—9.0
Загрязненные	20—50	0.3—0.1	2.0—1.0	4	3	1	5—6, 9—10
Грязные	51—100	0.1—0.02	<1.0—0.5	5	4	2	5—6, 9—10
Очень грязные	>100	<0.02	<0.5	5	5	5	2—4, 11—13



Сообщества гидробионтов, используемые в биоиндикации

Нейстон

Планктон

Нектон

Бентос

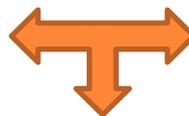
Перифитон

Дрифт

Фито- Зоо- Бактерио-

Использование некоторых структурных и функциональных характеристик сообществ фито-, зоо- и бактериопланктона и бентоса для оценки качества водной среды (наряду с абиотическими показателями) является **обязательным** (ГОСТ 17.1.3.07-82; ГОСТ 17.1.2.04-77; РД 52.24.565-96; РД 52.24.564-96; РД 52.24.420-95 и др.).

Бентос



- повсеместная встречаемость,
- достаточно высокая численность,
- относительно крупные размеры,
- удобство сбора и обработки,
- сочетание приуроченности к определенному биотопу с определенной подвижностью,
- достаточно продолжительный срок жизни, чтобы аккумулировать загрязняющие вещества за длительный период.
- не являются хозяйственно ценными или уникальными объектами,



...существует более 60 методов мониторинга качества поверхностных вод по показателям зообентоса (Баканов, 2000)

используемые показатели

- обилие организмов;
- статистическое распределение организмов;
- соотношение численность / биомасса;
- число видов и удельное видовое богатство;
- характер доминирования, ранговые распределения;
- соотношение крупных таксонов и экологических групп;
- пространственное распределение организмов (агрегированность, глубина проникновения в грунт), характеристики дрефта;
- трофическая структура;
- морфологические изменения;
- функциональные (в том числе продукционные) характеристики;
- системы сапробности, токсобности и сапротоксобности;
- биотические индексы;
- обобщенная функция желательности;
- корреляционные связи, методы теории графов;
- многомерные методы сравнения структуры сообществ;
- комбинации вышеприведенных методов;
- комплексные методы, включающие зообентос как один из компонентов.



Научный документ



Нормативный документ

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

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 ³ (кл/мл)	Количество сапрофитных бактерий, 10^3 кл/см ³ (кл/мл)	Отношение общего количества бактерий к количеству сапрофитных бактерий, 10^3 кл/см ³ (кл/мл)		
		Индекс сапробности по Пангелю и Буэку (в модификации Сладечка)	Отношение общей численности олигохет к общей численности дождевых организмов, %	Биотический индекс по Буденко, 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	$10^3 - 10^3$	1.0 - 2.5	≥ 2
IV	Загрязненные	2.51 - 3.50	51 - 65	4	3.1 - 5.0	10.1 - 50.0	Менее 10^3	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	0

Нормирование происходит преимущественно относительно **ОРГАНИЧЕСКОГО** загрязнения



Микробиологические показатели

Класс чистоты	Степень загрязнения	Общее количество бактерий, 10^6 кл/мл	Количество сапрофитных бактерий, 10^3 кл/мл	Отношение общего количества бактерий к количеству сапрофитных бактерий
I	Очень чистая	Менее 0,5	Менее 0,5	Более 10^3
II	Чистая	0,5-1,0	0,5-5,0	
III	Умеренно-загрязненная	1,1-3,0	5,1-10,0	10^3 - 10^2
IV	Загрязненная	3,1-5,0	10,1-50,0	Менее 10^2
V	Грязная	5,1-10,0	50,1-100,0	
VI	Очень грязная	Более 10	Более 100,0	



Олигохетные индексы Гуднайта–Уитли

Отношение общей плотности олигохет к общей плотности сообщества зообентоса (класс Oligochaeta – малощетинковые черви; многие их виды характеризуются повышенной устойчивостью к загрязнению и гипоксии, что определяет высокое абсолютное и относительное обилие олигохет в бентосе загрязненных водоемов).



Класс чистоты	Степень загрязнения	Отношение общей численности олигохет к общей численности донных организмов, в %
I	Очень чистая	1-20
II	Чистая	21-35
III	Умеренно-загрязненная	36-50
IV	Загрязненная	51-65
V	Грязная	66-85
VI	Очень грязная	86-100 или макрозообентос полностью отсутствует

Хирономидный индекс Балускиной



Биотический индекс Вудивисса

Индикаторная группа	Количество видов	Общее количество присутствующих групп организмов бентоса									
		0-1	2-5	6-10	11-15	16-20	21-25	26-30	31-35	36-40	41-45
Присутствуют нимфы Plecoptera (веснянки)	Более 1 вида	–	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	Только 1 вид	–	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Присутствуют нимфы Ephemeroptera (поленки)	Более 1 вида	–	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Только 1 вид	–	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Присутствуют личинки Trichoptera (ручейники)	Более 1 вида	–	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	Только 1 вид	4	4	5	6	7	9	9	10	11	12
Присутствует Gammarus (бокоплав)	Любое	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Присутствует Asellus («водяной ослик»)	Любое	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Присутствуют Oligochaeta, Chironomus (малощетинковые черви)	Любое	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Отсутствуют все перечисленные группы. Могут присутствовать организмы, не требующие растворенного кислорода	–	0	1	2	–	–	–	–	–	–	–

Класс чистоты	Степень загрязнения	Биотический индекс Вудивисса, баллы
I	Очень чистая	10 и более
II	Чистая	7-9
III	Умеренно-загрязненная	5-6
IV	Загрязненная	4
V	Грязная	2-3
VI	Очень грязная	0-1



Система сапробности

Сапробность (от греч. *sapros* — гнилой) – “это комплекс физиологических свойств данного организма, обуславливающий его способность развиваться в воде с тем или иным содержанием **органических** веществ, с той или иной степенью загрязнения”.

Система сапробности:

- это классификация организмов по их сопротивляемости загрязнению (органической нагрузке, недостатку кислорода, присутствию соединений сероводорода);
- классификация водоемов по соотношению двух конкурирующих абиотических факторов: "концентрации органических веществ естественного (детритного) характера" и "концентрации растворенного кислорода".

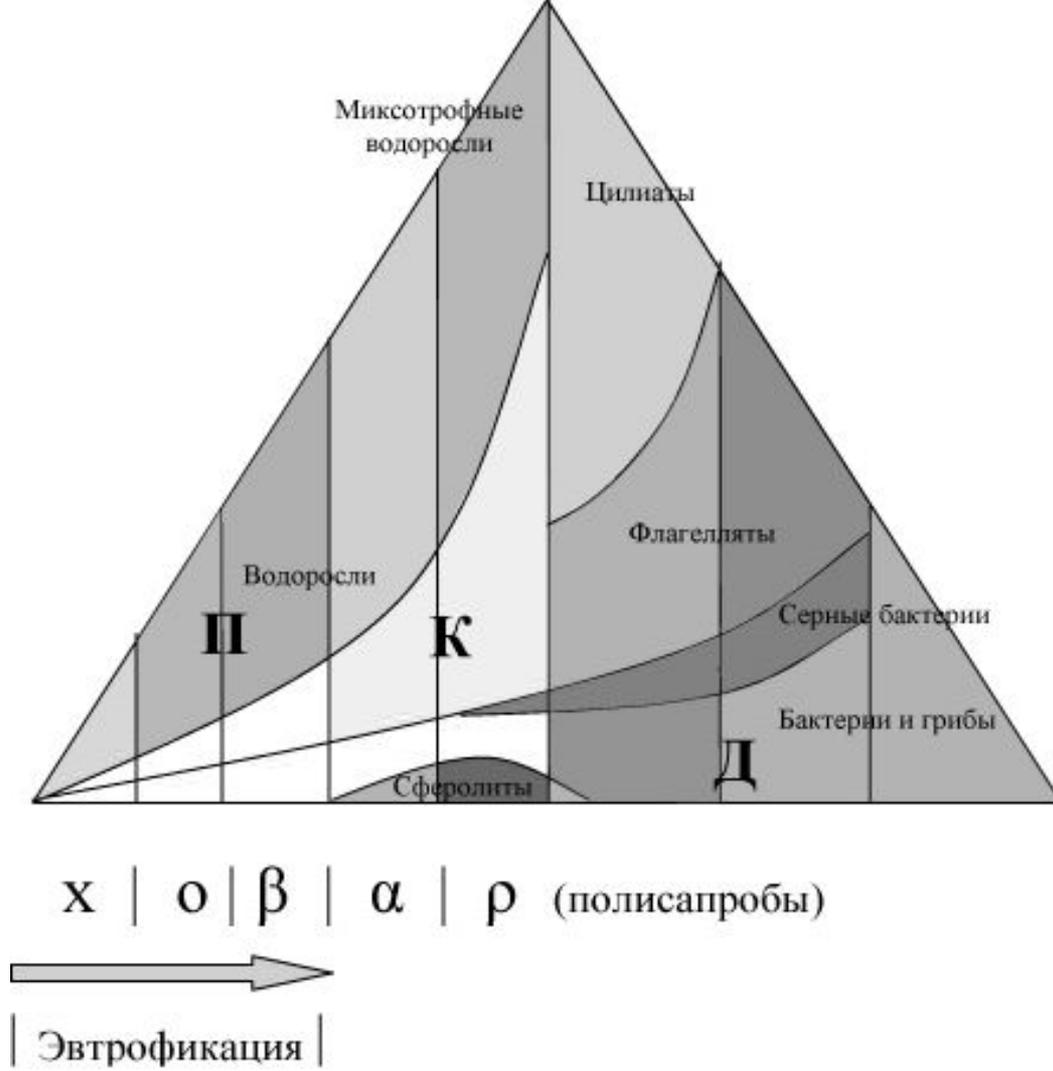
Зона сапробности	Класс чистоты	Определение
Ксеносапробная	I	Очень чистая
Олигосапробная	II	Чистая
Бета-мезосапробная	III	Умеренно-загрязненная
Альфа-мезосапробная	IV	Загрязненная
Полисапробная	V	Грязная
Гиперсапробная	VI	Очень грязная



Гидрохимические и гидробиологические особенности вод разных типов

Категория вод	Степень сапробности	Индекс сапробн.	Психрофильные бактерии, кл/см ³	Прочие бактерии, кл/см ³	Концентрация в мг/л			Специфические вещества и показатели
					БПК ₅	O ₂	H ₂ S	
Катаробная	Катаробн.	0	<5*10 ²		0	Разное	0	Остаточный хлор
Лимносаяпробн.	Ксеносаяпробн.	0-0,5	10 ³	10 ⁴	1	>8	0	
	Олигосаяпробн.	0,51-1,5	10 ⁴	5*10 ⁴	2,5	>6	0	
	β-мезосаяпробн.	1,51-2,5	5*10 ⁴	10 ⁵	5	>4	0	
	α-мезосаяпробн.	2,51-3,5	25*10 ⁴	10 ⁶	10	>2	0	
	Полисааяпробн.	3,51-4,5	2*10 ⁶	3*10 ⁷	50	>0,5	Следы	Eh<200 mV
Эусаяпробная	Изосаяпробн.	4,51-5,5	10 ⁷	3*10 ⁹	400	Следы	<1	Eh 50-200 mV
	Метасаяпробн.	5,51-6,5	10 ⁸	10 ¹⁰	700	0	<100	Eh<50 mV
	Гиперсаяпробн.	6,51-7,5	10 ⁹	10 ⁶	2000	0	<10	Птомаины
	Ультрасаяпробн.	7,51-8,5	10	0	120000	0	0	
Транссаяпробн.	Антисаяпробн.		0		0	Разное	0	Токсические вещества
	Радиосаяпробн.		Разное		Разное	Разное	0	Радиоактивные вещества
	Криптосаяпробн.		Разное		Разное	Разное	0	Физические факторы





Эмпирическая модель водной экосистемы по Сладечку (Sladecsek, 1973)

Р - продуценты, С - консументы, Д - деструкторы; зоны сапробности: х - ксено-, о - олиго-, β - бетамезо-, α - альфамезо-, ρ - полисапробная

Индикаторные виды и индексы сапробности

Система В. Сладечека [1973], включающая около 2000 индикаторных видов

Вид	s	x	o	b	a	p	I	S
<i>Siphonurus sp.</i>	o-a		3	4	3		2	2,05
<i>Baetis rhodani</i>	x-b	3	3	3	1		1	1,05
<i>Baetis vernus</i>	b		2	5	3		2	2,15
<i>Centroptilum pennulatum</i>	o-b	1	5	4			2	1,35
<i>Centroptilum luteolum</i>			2	7	1		3	1,85
<i>Cloeon dipterum</i>	o-a		3	4	3		2	2,05
<i>Oligoneuriella rhenana</i>	b		3	6	1		3	1,75
<i>Epeorus assimilis</i>	x-o	5	4	1			2	0,55
<i>Rhitrogena semicolorata</i>	x	10					5	0,1
<i>Heptagenia sulphurea</i>	b		1	6	3		3	2,25
<i>Ephemerella ignita</i>	o-a	1	3	3	3		1	1,95
<i>Ephemerella krieghoffi</i>	x-o	6	4				3	0,4
<i>Ephemerella major</i>	o-b	1	4	4	1		1	1,55
<i>Caenis horaria</i>	o		8	2			4	1,2
<i>Leptophlebia sp.</i>	b		3	6	1		3	1,75
<i>Paraleptophlebia submarginata</i>	o-b		5	5			3	1,5
<i>Prosopistoma foliaceum</i>	o		10				5	1
<i>Habrophlebia sp.</i>	o-b	1	4	4	1		1	1,55
<i>Palingenia longicauda</i>	o		7	3			4	1,3
<i>Potamanthus luteus</i>	b		1	6	3		3	2,25
<i>Ephoron virgo, syn. Polymitarcis virgo</i>	b			7	3		4	2,3
<i>Ephemera vulgata</i>	o-b		6	4			3	1,4

$$S_i = 0,1(0 \cdot \chi_K + 1 \cdot \chi_o + 2 \cdot \chi_\beta + 3 \cdot \chi_\alpha + 4 \cdot \chi_\Pi)$$

Отношение групп организмов к сапробности водной среды по
ГОСТ 17.1.2.04-77

Таблица 3.11

Таксономическая группа	Классы сапробности, в которых преобладают таксономические группы	
	значительное число видов	Незначительное число видов
Инфузории - ресничные - сосущие	ам – п о – ам	о, бм о, п
Губки	Бм	
Кишечнополостные (гидра, кордильфора)	Бм	
Черви: - ресничные - олигохеты исключение: - тубифициды и люмбрициды - пиявки - нематоды	Кс кс – бм ам – п бм – ам ам – п (при массовом развитии)	бм бм
Коловратки <i>Bdelloidea</i>	ам – п	
Мшанки	о – бм	
Моллюски: - брюхоногие - двустворчатые	о – бм о – бм	кс, ам ам
Ракообразные копеподы: - каланоиды - циклопоиды - ветвистоусые - равноногие (водяной ослик) - бокоплавы - речные раки - водяные клещи	о – бм бм – ам о – бм ам кс – о о бм – ам	кс о, кс кс, ам бм бм кс, о
Насекомые: - поденки - ручейники двукрылые - хирономиды - род хирономус	кс, о, бм кс, о, бм о, бм ам	 кс, ам бм, п



Индекс сапробности по Сладечку (1955)

$$\bar{S}_S = \frac{\sum_{i=1}^m (S_i N_i)}{\sum_{i=1}^m N_i}$$

\bar{S}_i – фактическая величина индекса сапробности i -го индикаторного вида;

N_i – его популяционная плотность, абсолютная или относительная
(доля от общей плотности всех m индикаторных видов в сообществе).



Необходимость учета загрязнений разной природы

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

Сапробность

Токсобность

Сапротоксобность



```
graph TD; A[Сапробность] --> C[Сапротоксобность]; B[Токсобность] --> C;
```

В.А. Алексеев «...существует единая неспецифическая реакция организмов в филогенезе на любое внешнее воздействие, может быть разработана универсальная шкала макробеспозвоночных индикаторов для различных видов антропогенного загрязнения вод и для всего комплекса повреждающих факторов в целом».

Л.П. Брагинский «...сейчас можно в общем виде утверждать, что токсобность гидробионтов в целом соответствует их сапробности и что виды, устойчивые к органическому загрязнению, в целом устойчивы и к загрязнениям токсическим».



Распределение организмов по токсобности (ГОСТ 17.1.2.04-77)

Экологическая	Таксономическая	Олиготоксобы	β -мезотоксобы	α -мезотоксобы	Политоксобы
Зоопланктон	Остриакоды		Все виды	Все виды	
	Водные клещи			Все виды	Все виды
	Кладоцера	Дафнии, сидиды, хищные, кладоцера	Хидориды, босминиды		
	Веслоногие		Каланоиды	Циклопоиды	
	Коловратки		Все, кроме α -мезотоксобо- в	Бделланды	
	Инфузории			Подвижные формы	Подвижные формы
	Бесцветные жгутико- вые			Все виды	Все виды
Зообентос	Ракообразные	Гаммариды, мизиды, коро- фииды, речной рак	Изопода		
	Харпактициды		Все виды	Все виды	
	Моллюски		Двустворчатые	Брюхоногие	
	Водные насекомые	Поденки	Поденки, стре- козы, ручейни- ки	Хирономиды, жуки, клопы, мокрецы, кули- циды	
	Черви		Олигохеты	Олигохеты, кроме политок- собо-в, пиявки, планарии	Тубифициды, лёмбрициды, нематоды

Интегральный показатель по Е.В. Балушкиной [1997]

разработан и используется для оценки состояния экосистем водоемов, подверженных смешанному органическому и токсическому загрязнению.

$$IP = K1 * St + K2*OI + K3*Kch + K4 / BI ,$$

где S_t – индекс сапротоксности В.А. Яковлева ($K1 = 25$); OI – олигохетный индекс Гуднайта и Уитлея, равный отношению численности олигохет к суммарной численности зообентоса в процентах ($K2 = 1$); K_{ch} – хирономидный индекс Балушкиной ($K3 = 8.7$); $1 / BI$ – величина, обратная биотическому индексу Вудивисса ($K4=100$).

Границы классов качества вод по показателям зообентоса (S_t , OI , K_{ch} , BI)
и интегральному показателю IP

Индекс сапротоксности Яковлева		Олигохетный индекс OI	Хирономидный индекс Балушкиной		Биотический индекс Вудивисса		Интегральный показатель IP	Класс качества вод по Былинкиной и Драчеву
S_t	$K_1 * S_t$		K_{ch}	$K_3 * K_{ch}$	BI	K_4 / BI		
1	25	0	0.14	1.22	10	10	36.22	Очень чистые
1.5	37.5	50	1.08	9.4	» 8.9*	20	116.9	Чистые
2.5	62.5	60	6.5	56.5	» 7.4*	33.3	212	Умеренно загрязненные
3.5	87.5	80	9	78.26	» 5.6*	50	295.76	Загрязненные
4	100	100	11.5	100	0	100	400	Грязные

Комбинированный индекс состояния сообщества по А.И. Баканову [1997, 1999].

численность (N), экз./м²; биомассу (B), г/м²; число видов (S); видовое разнообразие по Шеннону (H), бит/экз.; олигохетный индекс Пареле (ОИП, %), равный отношению численности олигохет-тубифицид к общей численности бентоса, среднюю сапробность (СС), рассчитываемую как средневзвешенную сапробность трех первых доминирующих по численности видов бентосных организмов.

$$КИСС = \left(\sum_{i=1}^k P_i \cdot R_i \right) / \sum_{i=1}^k P_i$$

комбинированный индекс состояния сообщества

где R_i – ранг станции по i -му показателю, P_i – "вес" этого показателя, k – число показателей.

станции ранжируются по каждому показателю, ранг 1 присваивается макс. значениям индексов

$$КИСС = (2B + N + H + S)/5$$

$$КИСС = (2СС + 1.5ОИП + 1.5B + N + H + S)/8$$

$$\underline{КИЗ = (СС + ОИП + B)/3 .}$$

комбинированный индекс загрязнения

Ранжирование показателей здесь проводится в обратном порядке

Вычисление коэффициента ранговой корреляции по Спирмену между значениями КИСС и КИЗ показывает, насколько загрязнение влияет на состояние сообществ зообентоса. При положительной корреляции состояние сообществ донных животных в значительной степени определяется наличием загрязнений.

Индекс экологического состояния по Т.Д. Зинченко и Л.А. Выхристюк

интегральный индекс экологического состояния экосистемы – ИИЭС

1. выделяется некоторое базовое подмножество измеряемых или рассчитываемых показателей гидрхимического и биологического мониторинга;
2. каждый показатель делится на диапазоны (с использованием статистических методов или экспертных оценок);
3. каждому выделенному диапазону ставится в соответствие оценка в баллах;
4. для каждого тестируемого объекта (например, участка реки) индекс определяется как усредненная сумма всех показателей в баллах.

Градации концентраций химических веществ для вычисления балльной оценки

Градации биологических показателей для вычисления балльной оценки

Показатели	Размерность	Баллы			
		1	2	3	4
		Пределы изменения концентраций			
Химическое потребление кислорода (ХПК)	мг О/л	> 60	31 - 60	20 - 30	< 20
Азот аммонийный $N - NH_4$	мг /л	> 2.5	0.51 - 2.5	0.20 - 0.5	< 0.20
Азот нитратный $N - NO_3$	мг /л	> 2.5	0.71 - 2.5	0.30 - 0.70	< 0.30
Азот нитритный $N - NO_2$	мг /л	> 0.1	0.021 - 0.1	0.005 - 0.02	< 0.005
Фосфаты $P - PO_4$	мг /л	> 0.3	0.101 - 0.3	0.03 - 0.1	< 0.03
Фенолы	мкг /л	> 10	1 - 10	следы	0

Показатели	Размерность	Баллы			
		1	2	3	4
		Пределы изменения показателей			
Численность макрозообентоса N	экз./м ²	0 – 500	501-1000	1001-10000	> 10000
Биомасса B	г/м ²	1 - 5.0	5.1 - 10.0	10.1- 15.0	> 15.0
Количество видов S	экз.	0 – 5	6 - 10	11 - 15	> 15
Индекс видового разнообразия Шеннона H	бит/экз.	0 - 1.0	1.1 - 2.0	2.1 - 3.0	> 3.0
Биотический индекс V	-	0 - 2	2 - 4	4 - 6	>6
Индекс Пареле D	-	0.81 –1.00	0.56 - 0.80	0.30 - 0.55	< 0.30

Категория водоема	Диапазон индекса
Зона экологического бедствия	<2
Зона экологического кризиса	2-3
Зона относительного экологического благополучия	>3

