



Co-funded by the  
Erasmus+ Programme  
of the European Union

The European Commission support for the production of this publication does not constitute an endorsement of the contents which reflects the views only of the authors, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования  
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

## КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

### Интегральная оценка устойчивости водных экосистем

Дмитриев В.В.,  
док. геогр. наук, профессор  
Алексеев Д.К.,  
канд. геогр. наук, доцент  
кафедра прикладной и системной экологии

## LECTURE NOTES

### Integral assessment of the sustainability of aquatic ecosystems.

Dmitriev V.V., DSc., Professor  
Department of Hydrology, SPBU  
Alexeev D.K., PhD, Associate Professor  
Department of Applied and Systems Ecology, RSHU

Санкт—Петербург  
РГГМУ  
2021

## 1. Современное состояние проблемы

Научный интерес к проблеме устойчивости и изменчивости природных экосистем и геосистем различных уровней иерархии сформировался в конце 60-х - начале 70-х гг. прошлого столетия. С одной стороны, это объяснялось успехами, достигнутыми классической экологией, и бурным развитием математической экологии. С другой стороны - необходимостью получения количественных оценок нагрузок на экосистемы, превышение которых приведет к "экологической катастрофе", т.е. разрушению экосистемы (Дмитриев, 2000). С решением этой проблемы неразрывно связана и проблема экологического нормирования, основным содержанием которой является поиск *нормы состояния* природной экосистемы, *нормы воздействия* на нее и ответной реакции экосистемы на внешнее воздействие (Дмитриев, 1994; 1995).

Несмотря на новизну данной проблемы, она уже успела обрасти изрядным количеством терминов, большей частью заимствованных из техники, математики и общей теории систем. *Стабильность, инертность, инерционность, инвариантность, равновесие, упругость, надежность, долговечность, пластичность, эластичность, саморегуляция, организованность, гомеостазис*, - вот далеко не полный терминологический аппарат, которым оперируют исследователи, затрагивая проблему устойчивости. Понятие "устойчивости" в экологии является наиболее полисемантическим. Прежде всего, так называют несколько разных свойств биосистем надорганизменного уровня. Далее, в пределах каждой из этих категорий имеется множество более конкретных ее определений и, соответственно, способов оценки, выражающих собственные представления различных исследователей о ее наиболее приоритетных критериях. В связи с этим в экологической литературе используются термины, обозначающих не только различные, но, часто, одни и те же категории устойчивости: *устойчивое равновесие, гомеостаз, способность сохранять гомеостаз, резистентность, упругость, резистентная устойчивость, упругая устойчивость, живучесть, персистенность, самоорганизуемость, устойчивость к воздействию*, и т.д.; в англоязычной литературе - *stability, perseverance, firmness, steadiness, elasticity, resilience, stationary*, и др. Большинство этих терминов произвольно используется авторами в разных значениях, для выражения собственных представлений об устойчивости. Наиболее очевидно различие двух основных значений термина *устойчивость*: во-первых, *устойчивость*, как способность системы длительно существовать, сохраняя свои основные свойства, или в неизменной среде, или в среде, возможные изменения которой не принимаются

исследователем во внимание; во-вторых, *устойчивость*, как способность системы противостоять внешнему воздействию, сохраняя свои свойства.

Чаще всего в экологической литературе термин *устойчивость* используется в следующих значениях. *Инертность системы* - способность экосистемы сохранять при внешнем воздействии исходное состояние в течение некоторого времени; *пластичность системы* - способность экосистемы переходить из одного состояния равновесия в другое, сохраняя при этом внутренние связи; *восстанавливаемость системы* - способность экосистемы возвращаться в исходное состояние после временного внешнего воздействия. Первые два понятия трактуются как *адаптационная устойчивость*, третье - как *регенерационная*.

Как отмечает И.Н. Росновский (1993), если убрать эмоциональные и словесные "накрутки", то все определения устойчивости природных систем сходятся в одном: **устойчивость системы - это ее способность сохранять свои свойства и параметры режимов в условиях действующих внутренних и внешних возмущений.** Такое определение совпадает с определением устойчивости в общей теории систем в кибернетике (Кафаров, 1985; Ackoff, 1960; Bertalanfi, 1962, цит. по И.Н. Росновский, 1993). По И.И.Мазуру и О.И.Молдаванову (1989) устойчивость - это свойство, внутренне присущее экосистеме, характеризующее способность: выдерживать изменения, создаваемые внешними воздействиями; оказывать сопротивление внешним (техногенным) воздействиям; обнаруживать способность к восстановлению или самовосстановлению экосистемы. В.А. Светлосанов (1990) ввел понятия *простой, эластичной и упругой стабильности* природных экосистем. *Эластичной стабильностью* он называет способность экосистемы вернуться в положение равновесия после кратковременного (не очень большого по амплитуде) возмущения, если период между возмущениями меньше времени релаксации системы. Чем меньше время возвращения системы после возмущения в устойчивое положение равновесия, тем эластичнее природная экосистема. В том случае, когда имеется лишь одно положение равновесия, в зависимости от того, насколько оно устойчиво к возмущениям, можно говорить о простой стабильности или нестабильности природных систем. Определения, связанные с устойчивостью водных экосистем обобщены в табл. 1.

Таблица 1. Основные понятия, связанные с устойчивостью водных систем (Дмитриев, 1995, 2000).

Понятие	Определение понятия
1. Устойчивость экосистемы к воздействию.	Способность экосистемы сохранять квазипостоянными свои свойства и параметры режимов в условиях действующих внутренних и внешних возмущений.
2. Уязвимость	Утрата экосистемой (отсутствие у экосистемы) способности сохранять

экосистемы.	квазипостоянными свои свойства и параметры режимов в условиях действующих внутренних и внешних возмущений.
3.Изменчивость экосистемы.	Свойство экосистемы менять характеристики своего функционирования вследствие изменений собственных параметров или при внешних возмущениях.
4.Чувствительность экосистемы	Способность экосистемы реагировать на незначительные по величине воздействия.
5.Период релаксации	Время, необходимое для приведения экосистемы в равновесное состояние из неравновесного после действия внутреннего или внешнего возмущающего фактора.
6.Пределы устойчивости (верхний и нижний)	Количество возмущающего фактора в единицах его измерения, которое приводит экосистему к необратимым изменениям. Применительно к такому фактору как температура, Б.Небел (1993) ввел понятие <i>диапазона устойчивости</i> (интервал температур от минимальной до максимальной, при которых еще возможен рост организма). Точки, ограничивающие интервал, он называет <i>пределами устойчивости</i> . Между <i>зоной оптимума</i> и <i>пределами устойчивости</i> , по его мнению, расположена стрессовая зона в рамках диапазона устойчивости по данному фактору.
7. Инертность	
8. Пластичность	Способность экосистемы сохранять при внешнем воздействии исходное состояние в течение некоторого времени.
9. Восстанавливаемость	Способность экосистемы накапливать результаты внешних воздействий, не изменяя при этом до определенного предела кардинально своих свойств и режима.
10. Упругость	Способность экосистемы возвращаться в исходное состояние после временного внешнего воздействия на нее.
11. Буферность или буферная емкость	Свойство экосистемы полностью возвращаться в исходное состояние после прекращения внешнего воздействия. Способность экосистемы сохранять присущее ей состояние и в определенной мере нейтрализовывать направленные на нее внешние воздействия.

В последние годы разработаны подходы к оценке устойчивости на основе построения сводных (интегральных) показателей, на основе репрезентативных критериев оценивания параметров режимов, характеризующих физико-географические, климатические, гидрологические особенности водного объекта, его продукционную способность и качество воды (Дмитриев, 1995, 2000; Дмитриев, Фрумин, 2004; Гальцова, Дмитриев, 2007; Примак, 2009).

## 2. Оценка устойчивости водных объектов на основе балльно-индексного подхода

Оценка устойчивости и уязвимости водоемов к изменению параметров режимов разработана нами на основе балльно-индексного метода, в основу которого положены различные классификации А.М. Владимирова и др.(1991); В.В. Снакина и др.(1992); А.Л. Ресина и др.(1992); В.В. Дмитриева (1995,1997) и подробно изложена в работах В.В. Дмитриева (2000) и В.В. Дмитриева и Г.Т. Фрумина (2004). Поскольку балльно-индексный подход требует выбора параметров и задания оценочных шкал устойчивости, он с одной стороны является интегральной балльной оценкой, а с другой стороны является основой для интегрального количественного подхода к оценке устойчивости (уязвимости) на основе построения сводных (интегральных) показателей. Кратко

приведем здесь метод балльно-индексной оценки уязвимости водоемов к изменению параметров режимов В.В.Дмитриеву (2000).

Оценка адаптационной устойчивости и уязвимости водоемов. Оценка уязвимости или устойчивости к изменению параметров режимов водоема получается как результат учета *многих свойств*, характеризующихся большим набором параметров оценивания, среди которых физико-географические и климатические условия и характер антропогенного воздействия являются определяющими. Исследование этих свойств и их изменчивости расширяет кругозор исследователя, обуславливает необходимость формирования у него эколого-географического (геоэкологического) мышления.

Следует заметить, что уязвимость (устойчивость) водных экосистем *циклического* (озера, слабопроточные водоемы, пруды) и *транзитного* (реки, сильно проточные водоемы) типов обусловлена разными природными механизмами. Устойчивость первого типа - *адаптационная*, устойчивость второго типа – *регенерационная*. Если в первом случае важнейшим свойством природной системы является ее способность *сохранять* исходное состояние или *плавно переходить* в другое состояние, сохраняя при этом внутренние связи (*инертность, пластичность*), то во втором случае на первое место выходит способность системы многократно *восстанавливать* свои свойства, возвращаться в исходное состояние после временного внешнего воздействия (*восстанавливаемость*). К этому можно добавить, что абиотические и биотические составляющие экосистемы по механизмам устойчивости также различаются между собой. Устойчивость первых достигается физико-механическими и химическими процессами переноса, разбавления, сорбции, миграции вещества; устойчивость вторых обусловлена способностью адаптации организмов к воздействию, как в результате внутренней резистентности биохимической организации, так и за счет способности к биохимическому разложению токсичных соединений и изменению удельных скоростей обменных процессов в экосистеме под влиянием воздействия.

Оценка адаптационной устойчивости и уязвимости водоемов проводится путем последовательного суммирования индексов для соответствующих признаков оценивания, разрядов и баллов по таблицам; получения суммарной балльной оценки и нахождению в итоге класса и подкласса устойчивости (уязвимости) водоема (таблицы 2-6). Таким образом, сначала необходимо последовательно просуммировать индексы (табл.2-4), затем разряды, в соответствии с примечаниями к каждой таблице. После этого по сумме разрядов (табл. 5) найти баллы уязвимости (семейство уязвимости), прибавить к ней баллы трофности или баллы качества вод (род уязвимости) и по полученной сумме баллов найти класс и подкласс уязвимости водоема (комбинация семейств и родов). Уязвимость по антропогенному эвтрофированию и по качеству воды (загрязнению) нами

рекомендуется оценивать отдельно, не смешивая эти понятия (реализуется идеология оценки трофосапробности), как это сделано в работе В.В. Снакина и др.(1992).

Рассмотрим подробно этапы оценивания. После выбора основных параметров и уровней оценивания находим значения индексов (1;2;3 или 4) по каждому из трех признаков по табл. 5, суммируем все три найденных значения индекса и по примечанию к таблице находим разряд водоема по физико-географическим и морфометрическим признакам.

Таблица 2. Классификация водоемов по физико-географическим и морфометрическим признакам

Признаки /значение индекса	1	2	3	4
Площадь поверхности, км <sup>2</sup>	>1000	1000-101	100-10	<10
Объем, км <sup>3</sup>	>10	10-1,1	1,1-0,5	<0,5
Максимальная глубина, м	>50	50-11	10-5,0	<5,0

**Примечание.** Водоем с суммой индексов от 3 до 4 относится к 1 разряду, от 5 до 7- к 6 разряду, от 8 до 11- к 11 разряду, от 11 до 12 - к 15 разряду.

Затем находим значения индексов (1;2;3;4 или 5) по каждому из трех признаков по табл.37, суммируем все три найденных значения индекса и по примечанию к таблице находим разряд водоема по первой группе гидрологических признаков (уровенный и температурный режимы). Отметим здесь, что на наш взгляд, чем меньше годовая амплитуда колебания уровня воды в водоеме, тем выше его адаптационная устойчивость и чем больше амплитуда, тем выше регенерационная устойчивость. В этом отличие нашей методики от подхода В.В. Снакина и др.(1992), в которой устойчивость водоемов тем выше, чем больше амплитуда колебания уровня воды в водоеме.

Таблица 3. Классификация водоемов по гидрологическому режиму (уровенный и температурный режим)

Признаки /знач. индекса	1	2	3	4	5
Годовая амплитуда колебания уровня, м	<3	---	3-7	---	>7
Средняя температура воды в летний период, °С	>20	20-15	<15	---	---
Продолжительность ледостава, мес.	>5	5-2	<2	---	---

**Примечание.** Водоем с суммой индексов от 2 до 4 относится к 1 разряду, от 5 до 7- ко 2 разряду, от 8 до 11- к 3 разряду. За температуру воды принимают среднюю из суточных величин за летний период для типичного по климатическим условиям года.

После этого находим значения индексов (1;2 или 3) по каждому из пяти признаков по табл.38, суммируем все пять найденных значения индекса и по примечанию к таблице находим разряд водоема по второй группе гидрологических признаков (условия водообмена).

Таблица 4. Классификация водоемов по гидрологическому режиму (условиям водообмена)

Признаки /знач. индекса	1	2	3
Наличие сезонной стратификации	да	Нет	-
Вертикальное перемешивание (количество раз за год)	<2	2	>2
Условия проточности	Бессточный	Сточный	Проточный
Характер регулирования стока	Многолетнее	Сезонное	Недельное или суточное
Водообмен в год	<0.1	0,1-5,0	>5,0

**Примечание.** Водоем с суммой индексов равной 5 относится к 1 разряду, от 6 до 8-ко 2 разряду, от 9 до 14-к 3 разряду.

Затем суммируем полученные по табл. 2-4 разряды и входим в левую часть табл. 5 (семейство уязвимости). Полученной сумме разрядов здесь ставится в соответствие определенное количество баллов. Запоминаем их для дальнейших расчетов.

*Класс* водоема в табл. 5 обозначен римской цифрой, он отражает физико-географические особенности водоема. *Подкласс* водоема обозначен большими буквами «А» и «Б», он отражает степень оптимальности условий формирования водности и качества воды. Оптимальными условиями являются не экстремальные условия, для которых сумма разрядов может быть наименьшей («А»), а *наиболее благоприятные* для формирования водности и качества воды промежуточные условия («Б»). Водоемы с благоприятными условиями формирования будем считать менее уязвимыми (более устойчивыми) по сравнению с водоемами с неблагоприятными условиями, поэтому в табл.5 им ставится в соответствие меньшее количество баллов. Чем меньшее количество баллов получено на данном этапе, тем менее уязвима экосистема.

Таблица 5. Балльная оценка уязвимости водоемов по физико-географическим, гидрологическим свойствам, трофности или качеству воды

Семейство уязвимости			Род уязвимости по трофическому статусу или по качеству воды		Основные комбинации семейств и родов для отмеченных (*) баллов трофии или качества			
Обозначение	Сумма разрядов	Баллы	Трофность Качество воды	Баллы трофности. Баллы качества воды	Обозначение	Сумма баллов	Обозначение	Сумма баллов
IA	3-5	8	1. Гипер. и эвтрофный *)	1	IB1	5	ШБ1	16
IB	6-9	4	2. Эвтрофн.-мезотрофн.	3	IB2	9	ШБ2	20
IIA	10-11	13	3. Мезотрофный *)	5	IB3	19	ШБ3	30
IIB	12-14	10	4. Мезотрофн.-олиготр.	8	IA1	9	ША1	19
IIIA	15-16	18	5. Олиготрофный *)	15	IA2	13	ША2	23
IIIB	17-19	15			IA3	23	ША3	33
IVA	20-21	22	1. Очень грязная и грязная *)	1	IB1	11	IVБ1	21
IVB	22-23	20	2. Загрязненная	3	IB2	15	IVБ2	25

		3. Умеренно загрязненная *)	5	ПБ3	25	IVБ3	35
		4. Чистая	8	ПА1	14	IVA1	23
		5. Очень чистая *)	15	ПА2	18	IVA2	27
				ПА3	28	IVA3	37

На следующем этапе необходимо получить баллы трофности (оценка уязвимости по антропогенному эвтрофированию) или баллы качества воды (оценка уязвимости по загрязнению). Для этого в первом случае необходимо установить трофический статус водоема, а во втором случае качество его воды.

Для оценки трофического статуса и качества воды также используется методика интегральной оценки (Дмитриева, 2000).

После этого снова входим в таблицу 39 (род уязвимости по трофическому статусу или по качеству воды) и по трофическому статусу или качеству воды выбираем соответствующие им баллы (от 1 до 15). Складываем их с баллами полученными ранее и получаем итоговое число баллов.

При оценке *уязвимости водной экосистемы к эвтрофированию* следует к полученной по табл. 5 сумме баллов (семейство уязвимости) прибавить баллы трофности (род уязвимости). Для этого необходимо предварительно оценить трофический статус водоема, а при оценке *уязвимости водной экосистемы к загрязнению (изменению качества воды)* к полученной по табл.39 сумме баллов (семейство уязвимости) необходимо прибавить баллы качества воды (род уязвимости). Для этого необходимо предварительно оценить качество воды водоема. В правой части табл.39 приводятся только основные комбинации семейств и родов для отмеченных (\*) типов трофии или классов качества воды. В табл. 6 приводятся результаты обобщения комбинаций и граничные значения баллов между классами уязвимости с учетом того, что первый класс характеризуется минимальной уязвимостью (максимальной устойчивостью), а последний класс – максимальной уязвимостью (минимальной устойчивостью).

Таблица 6. Классы уязвимости водоемов

Класс уязвимости	Сумма баллов	Обозначения основных комбинаций семейств и родов для отмеченных (*) баллов трофии или качества
I (мин.)	5-11	IB1, IB2, IA1, IB1
II	13-16	IA2, PA1, PB2, PB1,
III	18-23	IB3, IA3, PB2, PA2, PA1, PA2, IVB1, IVA1
IV	25-28	PB3, PA3, IVB2, IVA2
V (макс.)	30-37	PB3, PA3, IVB3, IVA3

Оценка регенерационной устойчивости водотоков. Оценка регенерационной устойчивости и уязвимости водотоков (Дмитриев, 2000) основана на последовательном суммировании индексов для соответствующих признаков оценивания, разрядов и баллов



по таблицам; получения суммарной балльной оценки и нахождению в итоге класса и подкласса уязвимости водотока. Таким образом, сначала необходимо последовательно просуммировать индексы, затем разряды, в соответствии с примечаниями к каждой таблице. После этого по сумме разрядов найти баллы уязвимости (семейство уязвимости), прибавить к ней баллы качества воды (род уязвимости) и по полученной сумме баллов найти класс и подкласс уязвимости водотока (комбинация семейств и родов).

Рассмотрим этапы оценивания. Сначала находим значения индексов (1;2;или 3) по каждому из трех признаков по табл.7, суммируем все три найденных значения индекса и по примечанию к таблице находим разряд водоема по физико-географическим признакам.

Таблица 7. Классификация водотоков по физико-географическим признакам (ГОСТ 17.1.1.02-77)

Признаки (индекс)	1	2	3
Географическая зона	недост. увлажнения	избыт. и переменн. увлажнения	---
Сезон года	зима	лето-осень	---
Период действия водотока	постоянный	---	временный

**Примечание.** Водоток с суммой индексов от 3 до 4 относится к 1 разряду, от 5 до 7-к о 2 разряду. К зоне недостаточного увлажнения относится равнинная территория, расположенная южнее изолинии  $0,5 \text{ л/с*км}^2$  в соответствии с картой 30-суточного стока 80% -ной обеспеченности за летне-осенний период.

Затем находим значения индексов (1;2; или 3) по каждому из четырех признаков по табл.8, суммируем все три найденных значения индекса и по примечанию к таблице находим разряд водоема по первой группе гидрологических признаков, характеризующих маловодную фазу.

Таблица 8. Классификация водотоков по характеру маловодной фазы

Признаки (индекс)	1	2	3
Продолжительность низкого стока, мес.	>2	---	<2
Характер стока, категория	Устойчивый	средний	прерывистый
Продолжительность ледостава, мес.	>5	5-2	<2
Продолжительность отсутствия стока, мес.	>1	---	<1

**Примечание.** Водоток с суммой индексов от 2 до 5 относится к 1 разряду, от 6 до 12 -к о 2 разряду.

После этого находим значения индексов (1;2 или 3) по каждому из трех признаков по табл.9, суммируем все три найденных значения индекса и по примечанию к таблице находим разряд водоема по второй группе гидрологических признаков, характеризующих температурный и водный режимы.

Затем находим значения индексов (1;2; или 3) по каждому из двух признаков по табл. 10, суммируем два найденных значения индекса и по примечанию к таблице находим разряд водоема по группе гидрологических признаков, характеризующих размер и водность водотоков.

Таблица 9. Классификация водотоков по гидрологическому режиму

Признаки (индекс)	1	2	3
Скорость течения, м/с	>1	0,2-1	<0,2
Колебания уровня, м	>2	2-1	<1
Температура воды, град.С	>15	15-10	<10

**Примечание.** Водоток с суммой индексов от 3 до 4 относится к 1 разряду, от 5 до 7-к о 2 разряду, от 8 до 9 – к третьему разряду.

Таблица 10. Классификация водотоков по размеру и водности

Признаки (индекс)	1	2	3	4
Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	>50000	50000-2000	---	<2000
Расход воды, м <sup>3</sup> /с	>100	100-5	<5	---

**Примечание.** Водотоки с суммой индексов 2 и 3 относятся к 1 разряду, 4 и 5-к 4 разряду, от 6 до 7 – к 6 разряду.

Затем суммируем полученные по табл. 7-10 разряды и входим в левую часть табл.11 (семейство уязвимости). Полученной сумме разрядов здесь ставится в соответствие определенное количество баллов. Запоминаем их для дальнейших расчетов.

Обращаем внимание, что *класс* водотока в табл.11 обозначен римской цифрой, он отражает физико-географические и гидрологические особенности водотока. *Подкласс* водотока обозначен большими буквами «А» и «Б», он отражает степень **оптимальности условий формирования водности и качества воды**. Оптимальными условиями являются не экстремальные условия, для которых сумма разрядов может быть наименьшей («А»), а *наиболее благоприятные* для формирования водности и качества воды промежуточные условия («Б»). Водотоки с благоприятными условиями формирования будем считать менее уязвимыми (более устойчивыми) по сравнению с водотоками с неблагоприятными условиями, поэтому в табл.11 им ставится в соответствие меньшее количество баллов. Чем меньшее количество баллов получено на данном этапе, тем более устойчива речная система к изменению параметров режимов.

Для покомпонентной оценки качества воды можно воспользоваться известными классификациями качества воды или наиболее известной из них, приведенной в таблице 12.

Качество воды оценивается на покомпонентной или на интегральной основе с указанием, по какому (каким) критериям выполнена оценка. После этого снова входим в таблицу 6 (род устойчивости по качеству воды) и по качеству воды выбираем

соответствующие баллы (от 1 до 15). Складываем их с баллами, полученными ранее, и получаем итоговое число баллов.

Таблица 11. Балльная оценка устойчивости водотоков к изменению физико-географических, гидрологических параметров, качества воды

Семейство устойчивости (класс по ГОСТ 1.1.02-77)			Род устойчивости по качеству воды		Основные комбинации семейств и родов для отмеченных (*) баллов качества воды			
Обозначение	Сумма разрядов	Баллы	Качество воды	Баллы	Обозначение	Сумма баллов	Обозначение	Сумма баллов
IA	3-5	14	1. Очень грязная и грязная *)	1	IB1	9	ШБ1	23
IB	6-7	8	2. Загрязненная	3	IB2	13	ШБ2	27
IIA	8	20	3. Умеренно загрязненная *)	5	IB3	23	ШБ3	37
ИБ	9-10	16	4. Чистая	8	IA1	15	ША1	27
IIIA	11	26	5. Очень чистая *)	15	IA2	19	ША2	31
IIIB	12-13	22			IA3	29	ША3	41
					IB1	17		
					IB2	21		
					IB3	31		
					IIA1	21		
					IIA2	25		
					IIA3	35		

\*) – возможно деление качества воды на большее количество классов. В этом случае соответственно увеличится количество комбинаций семейств и родов.

Таблица 12. Классификация загрязненности водных объектов по химическим параметрам (по Былинкиной, Драчеву, Ицковой; цит. по Зенин, Белоусова, 1988)

Класс качества Параметры	Очень чистые I	Чистые II	Умеренно загрязн. III	Загрязненные IV	Грязные V	Очень грязные VI
Растворенный кислород, %	95	80	70	60	30	0
Абс. Содержание, мг/л						
Лето	9	8	7-6	5-4	3-2	0
Зима	14-13	12-11	10-9	5-4	5-1	0
БПК <sub>5</sub> мгО/л	0,5-1,0	1,1-1,9	2,0-2,9	3,0-3,9	4,0-10,0	>10
ХПК мгО/л	1	2	3	4	5-15	>15
Аммонийный азот, мг/л	<0,05	0,1	0,2-0,3	0,4-1,0	1,1-3,0	>3,0

В правой части табл.11 приводятся только основные комбинации семейств и родов для отмеченных (\*) классов качества воды. В табл.13 приводятся результаты обобщения комбинаций и граничные значения баллов между классами устойчивости с учетом того, что первый класс характеризуется минимальной уязвимостью (максимальной устойчивостью), а последний класс – максимальной уязвимостью (минимальной устойчивостью).

Таблица 13. Классы устойчивости водотоков.

Класс устойчивости	Баллы	Обозначения комбинаций
I (макс.)	9-19	IB1, IB2, IA1, IB1, IB1
II	21-29	IB3, IA3, IB2, II A1, II A2, IB2, IB1, III A1

III (мин.)	31-41	ПБЗ, IAЗ, ППБЗ, ПАЗ, ППА2, ППАЗ
------------	-------	---------------------------------

### 3. Основания и принципы методики интегрального оценивания состояния и устойчивости водных объектов.

Для целей диагностики экологического состояния водоемов, интегральной оценки качества воды и неаддитивных свойств водной экосистемы (устойчивость) можно предложить несколько подходов, основанных на использовании методов анализа и обобщения натуральных данных.

Один из таких подходов заключается в применении методов многомерной статистической классификации параметров или признаков, характеризующих состояние водных экосистем.

Методы классификации совокупности объектов или признаков разработаны в настоящее время достаточно хорошо. Их принято делить на методы классификации при наличии обучающих выборок и методы классификации без обучения ("без учителя"). Под обучающими выборками обычно понимают некоторую совокупность объектов или признаков, классификация которых считается достоверно известной.

В первом случае предполагаются известными распределения векторов  $X$  внутри классов. Вектора задаются аналитически или с помощью перечисления всех возможных значений  $X$ . С использованием этой информации строится правило (алгоритм) классификации, с помощью которого совокупность объектов или признаков относят к одному из нескольких классов с известными (или полностью заданными) функциями распределения. К этому же типу принято относить и задачу, в которой распределения  $X$  внутри классов определены лишь частично. В этом случае используется два вида информации: предположение о свойствах распределения векторов (гладкость, принадлежность к некоторому известному параметрическому классу) и обучающая выборка. Обычно предполагается, что функции распределения векторов  $X$ , либо их сочетания принадлежат известному параметрическому классу с неизвестными значениями параметров.

Цель классификации без обучения сводится к разбиению всей анализируемой совокупности объектов на сравнительно небольшое число (заранее известное или нет) однородных, в определенном смысле, групп или классов. Результат разбиения зависит от выбора меры близости (сходства) между объектами. Знание такого количественного критерия как функционал качества разбиения позволяет оценить, какому из них отдать предпочтение. Выбор той или иной меры близости и того или иного функционала качества обычно осуществляется произвольно и опирается скорее на эмпирические и профессионально-интуитивные соображения, чем на строгую формализованную систему.

Известно, что основные этапы создания статистической классификации включают следующие ступени:

- описание пространства наблюдений, т.е. характеристика исходных данных;
- выбор системы  $X$  признаков, с помощью которых осуществляется переход из пространства наблюдений в пространство признаков;
- снижение мерности призначного пространства  $X$ , выбор системы обобщенных независимых признаков, с помощью которых пространство  $X$  переводится в пространство обобщенных признаков  $Y$ ;
- проведение классификации в пространстве  $Y$ ;

- интерпретация результатов применительно к решаемой задаче. Исследования временной изменчивости отдельных компонентов водных экосистем показали, что в настоящее время отсутствуют четкие представления о виде функций распределения даже для наиболее изученных гидрологических и гидрохимических параметров. Для некоторых гидрохимических, практически всех гидробиологических компонентов и показателей токсического загрязнения вод вопрос о виде функций распределения не ставился вообще. Таким образом, при решении задачи диагностики экологического состояния, качества природных вод и устойчивости водных экосистем в рамках рассматриваемого подхода исследователь всегда находится в условиях отсутствия или дефицита информации о распределении векторов  $X$  внутри классов. Более того, анализ информационных баз природных экологических данных свидетельствует об их существенной зашумленности. Поэтому представляется целесообразным применение методов ориентированных на использование нечисловой, неточной и неполной информации, что позволит работать в условиях зашумленности данных.

Предлагаемый подход к интегральной оценке устойчивости водных объектов можно рассматривать как своеобразное решение задачи многомерной статистической классификации параметров или признаков, ее характеризующих, при наличии обучающих выборок в виде существующих классификаций устойчивости водных объектов.

Метод интегрального оценивания, как и любой другой, требует формулирования ясных источников своего происхождения. Они, в этом случае, могут являться дополнительным подтверждением корректности выбора методологии.

Исторически, первым исследователем, применившим метод сводного (интегрального) показателя для оценивания военных проектов в начале прошлого века, был полковник российского флота, будущий академик А.Н.Крылов. Для получения сводной оценки А.Н.Крылов считал необходимым решить следующие вопросы: 1 - какие качества влияют на оценку сравнительного достоинства; 2 - каким числом каждое качество оценивается; 3 - какой способ группировки этих чисел принимается; 4 - какие

относительные множители приписываются тем качествам, которым отдается предпочтение.

Ответы на эти вопросы и сегодня определяют основные этапы построения интегральных показателей. Они предполагают: 1 - формирование вектора исходных характеристик, каждая из которых необходима, а все они вместе достаточны для полного оценивания исследуемого объекта; 2 - формирование вектора отдельных (нормированных) показателей, оценивающих различные аспекты исследуемого объекта; 3 - выбор вида синтезирующей функции, сопоставляющей вектору отдельных показателей сводную оценку, характеризующую исследуемый объект в целом; 4 - определение значения вектора параметров, обычно интерпретируемых как весовые коэффициенты (Хованов, 1996).

Все эти вопросы относятся к области *квалиметрии*, которую можно считать **первым основанием метода** интегрального оценивания. Саму квалиметрию можно определить как область науки об измерении и управлении качеством продукции и услуг. В настоящее время в рамках квалиметрии разработан широкий спектр математических моделей синтеза обобщенных оценок качества, позволяющих оценивать все многообразие социально-экономических благ. В эколого-географических исследованиях также накоплен объемный фактический материал об оценочных (нумерических, квалиметрических) шкалах признаков, аддитивных и неаддитивных свойств природных систем, находящихся на разных стадиях антропогенной трансформации, на основе обобщения большого числа натуральных наблюдений.

**Вторым основанием метода** сводных показателей является *теория функций полезности*. К настоящему времени накоплено множество математических моделей, позволяющих строить функции, оценивающие полезность в целом различных наборов хозяйственных благ. Сводные оценки при этом могут иметь как числовой ("кардинальная полезность"), так и нечисловой ("ординальная полезность") характер.

**Третьим основанием метода** является *теория экономических индексов*, оценивающих единым числом многопараметрические объекты и явления. Следует отметить, что именно в рамках теории построения индексов начался систематический сравнительный анализ синтезирующих функций различного вида.

Вышеупомянутые основания метода интегрального оценивания естественным образом дифференцируют сам процесс оценки на несколько основных этапов: 1) выбор и задание критериев и отдельных (нормированных) показателей, 2) выбор синтезирующей функции, 3) определение весовых коэффициентов для критериев, 4) расчет интегральных показателей. Для их осуществления Н.В. Хованов (1996) предложил следующие три принципа.

1. Принцип **линеаризации**, позволяющий переходить от частично упорядоченного по предпочтительности множества векторов отдельных показателей водных объектов к линейно упорядоченному множеству сводных оценок этих объектов.

2. Принцип **арифметизации**, позволяющий получать числовые оценки для исходной нечисловой информации, лежащей в основе построения показателей и определения весовых коэффициентов.

3. Принцип **рандомизации**, позволяющий моделировать дефицит, обычно существующий на всех этапах синтеза сводных оценок сложных многопараметрических объектов.

Эти три принципа составляют теоретическую основу метода интегрального оценивания.

#### 4. Этапы построения интегрального показателя устойчивости для условий неопределенности.

Нечисловая (порядковая), неточная (интервальная) и неполная (не для всех весовых коэффициентов заданы нетривиальные равенства и неравенства, соответствующие интервальной и порядковой информации) может использоваться для получения интегральной оценки устойчивости в условиях неопределенности задания весовых коэффициентов.

Этапы получения интегральной оценки в условиях неопределенности:

1. Отбор  $m$  исходных критериев  $X_1, \dots, X_m$ , которые образуют группы показателей, отражающих различные аспекты исследуемых свойств. При необходимости вводятся иерархические системы многоуровневого обобщения информации для сложных свойств. Определяются предельные значения  $X_{min}$ ,  $X_{max}$ , вид и монотонность связи исходных параметров с исследуемым свойством водного объекта.

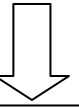
2. Для каждого критерия проводится нормирование показателей на основе нормирующих функций. В результате нормирования получаются показатели  $q_1, \dots, q_m$ ,  $0 \leq q_i \leq 1$ . Каждый  $q_i$  является функцией исходной характеристики  $q_i = q_i(x_i)$  позволяет оценить исследуемое свойство с точки зрения  $i$ -го критерия. Например, значение  $q_i = 1$  может свидетельствовать о благополучии объекта, а  $q_i = 0$  – о его неблагополучии (деградации) по данному критерию.

3. Вводится интерпретирующая (*синтезирующая*) функция  $Q(q) = Q(q_1, \dots, q_m)$ , агрегирующая нормированные показатели  $q_1, \dots, q_m$  в единый интегральный (*сводный*) показатель  $Q = Q(q)$ , сопоставляя,  $j$ -му свойству (т.е. его оценке  $q^{(j)} = (q_1^{(j)}, \dots, q_m^{(j)})$ ) некоторую числовую оценку  $Q^{(j)} = Q(q^{(j)}) = Q(q_1^{(j)}, \dots, q_m^{(j)})$ . На синтезирующую функцию, определяющую сводный показатель, накладываются ограничения:  $Q(0, \dots, 0) = 0$ ,  $Q(1, \dots, 1) = 1$ ,  $0 \leq Q \leq 1$ . Простейшей синтезирующей функцией является линейная функция вида:

$$Q = Q(q; w) = Q(q_1, \dots, q_m; w_1, \dots, w_m) = \sum_{i=1}^m q_i w_i$$

4. Задание весовых коэффициентов  $w = (w_1, \dots, w_m)$  - неотрицательные «*веса*», задающие *значимость* (важность) отдельных показателей для уровня оцениваемого свойства экосистемы ( $w_1 + \dots + w_m = 1$ ). Экспертная информация о весах (I) задается с помощью:

- ординальной (порядковой) информации - ОI:



$$5. \text{ Переход к } Q(q;I) = MQ(q;I): \bar{Q}^{(j)}(I) = \bar{Q}(q^{(j)};I) = \bar{Q}(q^{(j)}, \bar{w}(I)) = \frac{1}{N(m,n;I)} \sum_{t=1}^{N(m,n;I)} Q^{(t)}(q^{(j)}).$$

$$\text{Оценка точности } Q(q;I): [S^{(j)}(I)]^2 = \frac{1}{N(m,n;I)} \sum_{t=1}^{N(m,n;I)} [Q^{(t)}(q^{(j)}) - \bar{Q}^{(j)}(I)]^2$$

### 5. Характеристика этапов построения интегрального показателя устойчивости водного объекта.

Рассмотрим особенности приведенных этапов.

**Этап 1.** Этап состоит в отборе  $m$  исходных критериев  $X_1, \dots, X_m$ , которые образуют группы показателей, отражающих различные параметры исследуемых свойств. В практике экологического оценивания состояния водного объекта диагностированию подлежат следующие свойства водной экосистемы: *продуктивность (трофность), качество воды, токсическое загрязнение воды, устойчивость (уязвимость) к воздействию или изменению параметров естественного и антропогенного режимов, степень закисления и устойчивость к закислению, экологическое благополучие, экологическая ценность* и др (Дмитриев, 2000).

При выборе оценочных критериев нужно стремиться к тому, чтобы каждый из критериев был необходим, а все параметры вместе были достаточны для описания оцениваемого свойства. При этом могут существовать характеристики, увеличение значений которых приводит к улучшению значения качества (*первый тип*), а также характеристики, увеличение значений которых приводит к его ухудшению (*второй тип*). Кроме того, гипотетически возможно существование характеристик, критические значения которых разбивают оценочную шкалу на два интервала с противоположными свойствами влияния переменной на качество.

Одновременно с введением признаков (критериев) оценивания вводятся классы оценивания (классы устойчивости). В связи с этим необходимо проведение инвентаризации существующих классификаций оценки выбранного свойства. Кроме классификаций устойчивости здесь нам понадобятся также классификации качества воды и трофности. Такие классификации приводятся нами в работе «Экологическое нормирование и устойчивость природных систем», 2004. Известно, что всегда легче опираться на существующие (признанные ГОСТами) классификации, чем вводить свои,



но иногда просто необходимо бывает формировать авторские классификации для тех же целей. На этом же этапе определяются предельные значения  $X_{min}$ ,  $X_{max}$ , вид и монотонность связи исходных параметров с исследуемым свойством водного объекта (устойчивость).

На данном этапе всегда полезно проанализировать оценочные шкалы. Применительно к введенной классификации целесообразно отметить, все ли шкалы имеют левую и правую границы внутри классов; все ли шкалы являются непрерывными; возможны близкое к линейному или нелинейное изменение шкал. Шкалы имеют разные погрешности и точность задания характеристик.

Необходимо проанализировать исходные оценочные шкалы и классификацию в целом. Отметить, что некоторые шкалы не являются непрерывными и равномерными. Изменение характеристик внутри шкал может быть равномерным или иметь недостатки. Например, недостатком шкалы является наличие разрывов изменения параметра между классами. В практике оценивания рекомендуется избегать этого.

Чаще всего шкалы являются непрерывными, но неравномерными. Отмечается наличие в рассматриваемой классификации параметров первого и второго типа (прямая и обратная связь), о которых говорилось выше.

При необходимости вводятся левая и правая границы для всех исходных характеристик, хотя заметим, что данная процедура не является строго обязательной. Можно работать с показателями, отнесенными к серединам классов или с граничными значениями (между классами). При этом необходимо помнить, что в качестве правой границы параметров, характеризующих наилучшее качество (обычно I класс) должны задаваться значения критериев, не противоречащие принятым предельно допустимым концентрациям веществ. В любом случае лучше убедиться в том, что правые границы принятых условий не противоречат отечественным или европейским стандартам, если таковые имеются.

**Этап 2.** Для каждого критерия проводится нормирование показателей на основе разработанных нормирующих функций, учитывающих вид (прямая, обратная) и линейность (нелинейность) связи выбранного критерия с оцениваемым свойством. В результате нормирования получаются безразмерные показатели, названные выше «отдельными»  $q_1, \dots, q_m$ ,  $0 \leq q_i \leq 1$ . Каждый «отдельный» показатель  $q_i$  является функцией исходной характеристики  $q_i = q_i(x_i)$  позволяет оценить исследуемое свойство с точки зрения  $i$ -го критерия.

В качестве нормирующей функции будем использовать неубывающую кусочно-степенную функцию вида

$$q_i = q_i(x_i) = \begin{cases} 0, & x_i \leq \min_i, \\ \left( \frac{x_i - \min_i}{\max_i - \min_i} \right)^\lambda, & \min_i < x_i \leq \max_i, \\ 1, & x_i > \max_i \end{cases} \quad (1)$$

Функция вида (1) приводится в работе Н.В. Хованова (1996). Такая функция может быть использована в случае, когда увеличение значения  $i$ -ой исходной характеристики не влечет снижения уровня свойства (объекта), оцениваемого с точки зрения  $i$ -го критерия. При этом всем параметрам со значениями  $x_i$ , не превосходящими некоторого фиксированного уровня  $\min_i$ , приписывается минимальное значение  $i$ -го отдельного показателя, а параметрам со значениями  $x_i$ , превосходящими фиксированный уровень  $\max_i$  - максимальное значение этого отдельного показателя. Исследователь должен дополнительно выбрать показатель степени  $\lambda$ , определяющий характер и степень выпуклости нормирующей функции  $q_i(x_i)$ : при  $\lambda > 1$  соответствующая нормирующая функция выпукла вниз, а при  $\lambda < 1$  - вверх. Применительно к оценке устойчивости анализ использования  $\lambda$  дан в работе Е.А. Примак (2009).

Если при увеличении значения  $i$ -ой исходной характеристики уровень устойчивости, оцениваемый по  $i$ -му критерию, не возрастает, то может быть применена невозрастающая кусочно-степенная функция вида

$$q_i = q_i(x_i) = \begin{cases} 1, & x_i \leq \min_i, \\ \left( \frac{\max_i - x_i}{\max_i - \min_i} \right)^\lambda, & \min_i < x_i \leq \max_i, \\ 0, & x_i > \max_i. \end{cases} \quad (2)$$

Особенно просто построение нормирующих кусочно-линейных функций, получающихся при подстановке в формулы (1), (2) значения параметра  $\lambda = 1$ . На первом этапе исследований, чаще всего используются именно такие простейшие нормирующие функции, учитывая, что выбор линейной нормировки всегда может быть оправдан в начале исследования.

Диапазон изменения  $q_i$  всегда находится в пределах от 0 до 1. Таким образом, исходные параметры в различных шкалах измерения (абсолютные и средние величины в конкретных единицах измерения, относительные или балльные оценки и т.п.) приводятся к единой безразмерной шкале, после чего над их значениями можно производить математические действия с целью получения интегрального показателя устойчивости. Особенно просто построение нормирующих кусочно-линейных функций, получается при подстановке в формулы (1), (2) значения параметра  $\lambda = 1$ . Зададим минимальные и

максимальные значения параметров. В качестве  $\text{mini}$ , как правило, будем использовать левое граничное значение критерия для первого класса, а в качестве  $\text{maxi}$  - правое граничное значение для последнего класса. Для параметров, связанных с оцениваемым свойством обратной зависимостью – наоборот.

**Этап 3.** Вводится функция  $Q(q) = Q(q_1, \dots, q_m)$ , агрегирующая нормированные показатели  $q_1, \dots, q_m$  в единый интегральный (сводный) показатель  $Q = Q(q)$ . На синтезирующую функцию, определяющую сводный показатель, накладываются ограничения:  $Q(0, \dots, 0) = 0$ ;  $Q(1, \dots, 1) = 1$ ;  $0 \leq Q \leq 1$ . Простейшей синтезирующей функцией, рекомендуемой Н.В. Ховановым (1996), является линейная функция вида:

$$Q = Q(q; w) = Q(q_1, \dots, q_m; w_1, \dots, w_m) = \sum_{i=1}^m q_i w_i$$

Сложившаяся практика эколога-географических исследований показывает, что чаще всего в оценочных исследованиях встречаются взвешенные средние арифметические, взвешенные средние геометрические и их комбинации. Показано (Джини, 1970; Воробейчик, Садыков, Фарафонов, 1994), что среднее арифметическое и среднее геометрическое значения связаны между собой:

$$\bar{X}_G = \bar{X}_A - \frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{\bar{X}_A},$$

где  $\bar{X}_G$  - средняя геометрическая;  $\bar{X}_A$  - средняя арифметическая,  $\sigma^2$  - дисперсия.

Авторы делают вывод о том, что т.н. «особая роль» среднего геометрического несостоятельна и не добавляет новой информации, но лишь усиливает «камуфляж наукообразия» в научных исследованиях.

**Этап 4.** Моделирование весовых коэффициентов. Рассчитываются  $w = (w_1, \dots, w_m)$  - неотрицательные «веса», задающие значимость (важность, весомость, приоритетность) отдельных параметров для оцениваемого свойства ( $w_1 + \dots + w_m = 1$ ), с учетом экспертной информации о весах (I) на основе ординальной и интервальной информации, задаваемой экспертами.

Как правило, уже само составление программы оценочных исследований является первичным «взвешиванием» параметров и их свойств. Однако такое взвешивание оказывается недостаточным, так как влияние отобранных критериев также неравнозначно, что вызывает необходимость придавать при оценке различным параметрам (свойствам, компонентам) разные приоритеты, веса или коэффициенты значимости. Нередко при этом

вес вводится без какого-либо четкого обоснования. Чаще всего применяются следующие способы учета "веса" отдельных критериев качества: вес каждого из отобранных параметров принимается равным; вес наиболее важных параметров увеличивается или вес второстепенных показателей уменьшается в условное число раз; вес определяется с помощью мнений экспертов; вес каждого параметра определяется с помощью дополнительных расчетов. В самом простом случае, при равенстве весов исходных параметров, вес определяется простой формулой  $p_i = 1/n$ .

Воспользовавшись правилами:  $0 \leq p_i \leq 1$  и  $\sum_{i=1}^n p_i = 1,0$  и задавшись некоторой точностью расчета, можно рассчитать веса на основе моделирующего алгоритма.

Выбор точности отсчетов  $h = 1/n$  весовых коэффициентов позволяет перейти от бесконечного набора  $W$  всех возможных векторов к конечному набору (дискретному симплексу)  $W(m,n)$  всех возможных векторов с дискретными компонентами. Задание дополнительной экспертной информации  $I = O \cup \Pi$  позволяет перейти от набора  $W(m,n)$  всех возможных векторов  $w(t) = (w_1(t), \dots, w_m(t))$  с дискретными компонентами к набору  $W(I; m, n) = \{w(s), s=1, \dots, N(I; m, n) \leq N(m,n)\}$  всех допустимых векторов, удовлетворяющих требованиям экспертной информации.

Моделирование неопределенности выбора конкретного вектора  $w(t) = (w_1(t), \dots, w_m(t))$  из класса допустимых векторов  $W(I; m, n)$  осуществляется при помощи случайной  $m$ -мерной величины  $w(I) = (w_1(I), \dots, w_m(I))$ , равномерно распределенной на множестве  $W(I; m, n)$ . (Хованов, 1996).

**Этап 5.** Осуществление перехода к интегральной оценке  $Q(q; I) = MQ(q; I)$ :

$$\bar{Q}^{(j)}(I) = \bar{Q}(q^{(j)}; I) = \bar{Q}(q^{(j)}, \bar{w}(I)) = \frac{1}{N(m, n; I)} \sum_{t=1}^{N(m, n; I)} Q^{(t)}(q^{(j)})$$

Полученные реализации  $w(t)$  случайного вектора  $w$  позволяют отыскать набор всех допустимых функций свертки  $Q(I; m, n) = \{Q(s)(q) = Q(q; w(s)), s=1, \dots, N(I; m, n)\}$ , получить усредненную оценку состояния объекта в виде математического ожидания  $\bar{Q}(q; I) = M\tilde{Q}(q; I)$ , содержащего в неявном виде нечисловую, неточную и неполную информацию.

Точность полученной оценки  $\bar{Q}(q; I)$  определяется стандартным отклонением

$S(q; I) = \sqrt{DQ(q; I)}$  случайной величины  $\bar{Q}(q; I)$ :

$$[S^{(j)}(I)]^2 = \frac{1}{N(m, n; I)} \sum_{t=1}^{N(m, n; I)} [Q^{(t)}(q^{(j)}) - \bar{Q}^{(j)}(I)]^2$$

Сравнение объектов  $x(r), x(s) \in X$  проводится по величине математического ожидания их сводных показателей  $\bar{Q}(q(r); I)$   $\bar{Q}(q(s); I)$ .

Достоверность сравнения измеряется вероятностью  $P(r, s, I)$  попарного стохастического доминирования ( $\bar{Q}(q(r); I) > \bar{Q}(q(s); I)$ ).

Достоверность того, что сводный показатель качества  $j$ -го объекта превосходит по величине сводный показатель устойчивости  $l$ -го объекта может быть оценена долей

$$P(j, l; I) = \frac{N\{t: Q^{(t)}(q^{(j)}) > Q^{(t)}(q^{(l)})\}}{N(m, n; I)}$$

всех допустимых значений  $Q^{(t)}(q^{(j)})$ ,  $Q^{(t)}(q^{(l)})$ ,  $t = 1, \dots, N(m, n; I)$ , для которых выполнено соответствующее неравенство (Хованов, 1996).

**Этап 6.** Апробация подхода для оценки устойчивости водоемов.

При апробации методики:

Для информации, собранной в полевых условиях выполняется первый уровень обобщения информации по правилам построения обучающей классификации;

Выполняются последующие уровни обобщения информации;

Выполняется районирование (зонирование) территории (акватории) по величине интегральных показателей для выявления экстремальных уровней и районов или степени уязвимости к антропогенной трансформации экосистем по величине интегрального показателя устойчивости.

Литература к разделу:

Алексеев, Д. К., Гальцова, В. В., & Дмитриев, В. В. (2011). Экологический мониторинг: современное состояние, подходы и методы. Часть I. РГГМУ. 2011.

Никаноров А.М., Хоружая Т.А., Бражникова Л.В., Жулидов А.В. Мониторинг качества вод: оценка токсичности. С.-Петербург. Гидрометеиздат. 2000. 159 с.

Примак Е.А., Зуева Н.В., Алексеев Д.К., Воякина Е.Ю. Нормирование и снижение негативного воздействия на водные экосистемы: учебное пособие для высших учебных заведений. – СПб.: РГГМУ, 2020. – 116 с.  
[http://elib.rshu.ru/files\\_books/pdf/rid\\_8794dfe0fce0442bac20dbb67e76abec.pdf](http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/rid_8794dfe0fce0442bac20dbb67e76abec.pdf)

Саноцкий И.В., Уланова И.П. Критерии вредности в гигиене и токсикологии при оценке опасности химических соединений. М., : Медицина, 1975, 328 с.

Смит У. Х. Лес и атмосфера. Взаимодействие между лесными экосистемами и примесями атмосферного воздуха. М.: Прогресс, 1985. 429 с.

Спирин Д. А., Романов Г. Н., Федоров Е. А., Алексахин Р. М. Радиоэкологический сдвиг в фитоценозах и возможный критерий его прогнозирования//Экология. 1988. № 4. С. 25—29.

Справочник по гидрохимии. Под ред.А.М.Никанорова, Л., Гидрометеиздат, 1989, 392 с.

Степанов А.М. Методология биоиндикации и фонового мониторинга экосистем суши // Экотоксикология и охрана природы. М., 1988, с.28-108.

Строганов Н.С. Принципы оценки нормального и патологического состояния водоемов при химическом загрязнении // Теоретические вопросы водной токсикологии. Л., 1981, с.16-29.

Фенева И. Ю., Незлин Н. П. Модельное исследование существенности элементов экологической системы на примере сообщества Рыбинского водохранилища//Человек и биосфера. М., 1982. Вып. 6. С. 177—183.

Хованов Н.В. Анализ и синтез показателей при информационном дефиците. СПб., 1996. 196 с.

Хованов Н.В. Математические модели риска и неопределенности. СПб., 1998. 204 с.

Черненькова Т. В. Фитоиндикация ранних стадий техногенного нарушения северотаежных биоценозов // Биоиндикация и биомониторинг М 1991. С. 114-120.

Черненькова Т. В., Степанов А. М. Подстилка как показатель нарушенности биогеоценоза в результате техногенного воздействия // Роль подстилки в лесных биогеоценозах. М., 1983. С. 207—208.

Черненькова Т. В., Степанов А. М., Гордеева М. М. Изменение организации лесных фитоценозов в условиях техногенеза//Журн общ биологии. 1989. Т. 50, № 3. С. 388—394.

Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. – Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. – 463 с.

Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы, критерии, решения: в 2 кн., М.: Наука, 2005, кн.1.- 281 с., кн.2 – 337 с.