

После обсчета получены общие соотношения для выходных параметров

$$\hat{Y}_1 = 6,398(-36,508x_1 + 82,048x_1^2 + 3,8499)(0,033x_2 - 0,0002x_2^2 - 0,3395)$$

$$\hat{Y}_2 = 0,025(3,1942x_1 - 3,9604x_1^2 + 0,6006)(-0,0092x_2 + 0,00006x_2^2 + 1,2408)$$

Анализ уравнения регрессии показывает, что на остаточную концентрацию ионов меди Cu^{2+} и объем образующегося осадка в большей степени оказывает влияние доза реагента-осадителя ТМТ-15 и в меньшей степени исходная концентрация.

Таким образом, полученные данные экспериментальных исследований были использованы для разработки проекта по реконструкции очистных сооружений с применением современного реагента.

Библиографический список

1. Илюшина С.В. Методы оптимизации технологических процессов / С.В. Илюшина // Вестник казанского технологического университета. Казанский национальный исследовательский технологический университет – 2014. – Т. 17. – № 8. – С. 323-327.
2. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. Учебное пособие для химико-технологических вузов / В.В. Кафаров. – М.: Химия, 1985. – 448 с.
3. Закгрейм А.Ю. Введение в моделирование химико-технологических процессов / А.Ю. Закгрейм. – М.: Химия, 1982. – 288 с.

Кушнеров А.И., аспирант,
Шишкин А.И., профессор,
Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна

КОМПЛЕКСНЫЕ КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА ВОДЫ РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ ДЛЯ НОРМИРОВАНИЯ ДОПУСТИМЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Аннотация: в работе предложены новые подходы по оценки качества воды водных объектов по комплексным и интегральным показателям. Проведен обзор по комплексным гидрохимическим и гидробиологическим показателям. Расширена методика сводных показателей по выбору критериев важности и применена для комплексных индексов. Выполнен расчет интегрального индекса качества воды по девяти водным объектам для нормирования допустимого химического воздействия в бассейне северной части Финского залива.

Ключевые слова: качество воды, комплексные индексы, интегральные индексы, оценка, нормирование.

Определение качества воды по индивидуальным показателям (концентрации загрязняющих веществ, растворенному кислороду, биологическому потреблению кислорода, водородному показателю, количеству зообентосных и зоопланктонных организмов и др.), а на их основе расчет интегральных показателей (индекса загрязнения воды, индекса трофности $\text{pH}_{100\%}$, индекса сапробности и др.) представляет собой комплексную оценку, которая широко применяется на современном этапе экологического нормирования. Но при таком подхо-

де каждый показатель или индекс дает свою качественную характеристику, т.е. оценка является неоднозначной.

Большой вклад в решение данного вопроса внес Дмитриев В.В. [1], который смог дать объективную интегральную оценку, включающую различные гидробиологические и гидрохимические показатели. Однако, используя математический метод свертки комплексных показателей Дмитриев В.В. не учел повторяемость превышения концентраций над предельно допустимыми (повторяемость загрязнения) в воде, которая заложена в удельном комбинаторном индексе загрязнения воды (УКИЗВ).

Таким образом, появилась идея проанализировать имеющиеся комплексные показатели и используя приведенный математический аппарат представить более объективную оценку экологического состояния водных объектов уже с учетом УКИЗВ. Кроме этого на примере водных объектов бассейна Финского залива рассчитать по результатам исследований разработанный интегральный индекс.

Вышеуказанный подход, который использовал Дмитриев В.В. для интегральной оценки носит название «Метод сводных показателей» (МСП) и применяется во многих научных областях [1].

Данный метод используется для свертки информации и позволяет объединять различные показатели, начиная от «простых» заканчивая комплексными, которые имеют различные диапазоны и размерности.

Разработка интегрального подхода состоит из следующих этапов:

1. Выбор и обоснование критериев;
2. Объединение классификаций критериев;
3. Перевод всех шкал (размерностей) критериев к единой;
4. Выбор вида интегрального индекса;
5. Определение весовых коэффициентов для критериев;
6. Вывод формулы и новой классификации.

В качестве критериев выступают комплексные оценки. Для выбора комплексных оценок рассмотрим те, которые наиболее часто используются на практике. Основанные на гидрохимических показателях представлены в таблице 1 по литературному обзору Шитикова В.К и др. [2].

Таблица 1

Комплексные оценки по гидрохимическим показателям

№ п/п	Комплексная оценка	Расчетная формула	Краткое описание
1.	Гидрохимический индекс загрязнения воды (ИЗВ)	$\text{ИЗВ} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\text{ПДК}_i}$	ИЗВ введен Госкомгидрометом СССР в 1986 г. Индекс представляет собой среднюю долю превышения ПДК по строго лимитированному числу индивидуальных ингредиентов.
2.	Показатель химического загрязнения воды (ПХЗ-10)	$\text{ПХЗ10} = \frac{C_1}{\text{ПДК}_1} + \frac{C_2}{\text{ПДК}_2} + \dots + \frac{C_{10}}{\text{ПДК}_{10}}$	Показатель химического загрязнения вод, по десяти соединениям, максимально превышающим ПДК. Расчет проводится при выявлении зон чрезвычайной экологической обстановки.

			гической ситуации.
3.	Удельный комбинаторный индекс загрязнения воды (УКИЗВ)	$K_i = \frac{C_i}{\text{ПДК}_i};$ $H_i = \frac{N_{\text{ПДК}_i}}{N_i};$ $B_i = K_i \cdot H_i.$	Рассчитывается индекс согласно РД 52.24.643-2002 и включает в себя определение кратности превышения ПДК и повторяемость случаев превышения ПДК.
4.	Индекс трофности водоемов (рН _{100%} либо ITS)	$\text{рН}_{100\%} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{рН}_i}{n} +$ $+ \alpha \cdot \left(100 - \frac{\sum_{i=1}^n [\text{O}_2]_i}{n} \right)$	Разработан индекс Цветковой Л.И. на основе зависимости водородного показателя и концентрации растворенного кислорода в воде и характеризует продукционно-диструкционный баланс в водоеме.
5.	Методика НИИ гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана	$W = 1 + \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (\delta_i - 1)$ $\delta_i = \frac{C_i}{N_i}$	Для определения степени загрязнения используются четыре критерия вредности: санитарного режима, органолептических свойств, учитывающий опасность санитарно-токсикологического загрязнения и эпидемиологический критерий.
6.	Экотоксикологический критерий по Т.И. Моисеенко	$X_{\text{сум}} = X_{\text{токс}} + X_{\text{ф-х}} + X_{\text{звт}}$	Индекс учитывает загрязнение токсическими веществами, сульфат-ионами, содержание взвешенных веществ, общей минерализации и эвтрофирование по концентрации минерального фосфора.
7.	Комплексная оценка загрязненности вод по Г.Т. Фрумину и Л.В. Баркану	$d_i = e^{-e^{P_i}}$ $P_i = b_0 + b_1 \cdot \frac{C_i}{\text{ПДК}_i}$ $D = (d_1 \cdot d_2 \cdot \dots \cdot d_n)^{\frac{1}{n}}$	Методика включает расчет для каждого ингредиента функцию желательности Харрингтона. Итогом расчета является класс качества воды.
8.	Метод классификации качества вод по В.П. Емельяновой	Отношение значений к ПДК. И выделение уровней ПДК, 10•ПДК, 30•ПДК и т. д	Метод учитывает превышение значений гидрохимических индивидуальных показателей над ПДК.

Анализируя комплексные оценки, основанные на гидрохимических показателях, в качестве одного из критериев был выбран индекс УКИЗВ, как наиболее полно отражающий картину по химическому составу воды и позволяющий наряду с рекомендуемыми показателями использовать дополнительные. Индекс на практике применяется Комитетом по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности с 2006 года по настоящее время для расчета класса качества водотоков г. Санкт-Петербурга. К тому же методические указания для расчета являются единственными утвержденными в России, среди подобных оценок.

Комплексные оценки, основанные на гидробиологических показателях, представлены в таблице 2 по литературному обзору Шитикова В.К и др. [2].

Комплексные оценки по гидробиологическим показателям

№ п/п	Комплексная оценка	Расчетная формула	Краткое описание
1.	Индекс Шеннона (H)	$H = - \sum_{i=1}^m \left(\frac{n_i}{N} \cdot 1,44 \cdot \ln \frac{n_i}{N} \right)$	Индекс оценивает уровень загрязнения биоценозов. Максимальным индекс будет в случае, когда каждая особь принадлежит к отдельному виду, а минимальным – когда все особи относятся к одному виду.
2.	Индекс сапробности по Р. Пантле и Г. Букка (S)	$S = \frac{\sum_{i=1}^N (s_i \cdot h_i)}{\sum_{i=1}^N h_i}$	Индекс сапробности рассчитывается исходя из индивидуальных характеристик различных видов водных сообществ зоопланктона по полученным значениям выделяют зоны сапробности в водоемах.
3.	Олигохетный индекс Гуднайта и Уителя (J)	$J = \frac{N_{\text{олиг}}}{N_{\text{общ}}} \cdot 100$	По показателю индекса судят о степени эвтрофикации водоема. Чем больше в пробе обнаружено олигохет (от общего числа), тем состояние водного объекта хуже.
4.	Биотический индекс Ф. Вудивисса	Определительная таблица	Индекс основан на уменьшении разнообразия фауны и характерном изменении состава макробентоса при увеличении загрязнения.

Среди представленных методов оценки качества воды по зообентосным и зоопланктонным организмам выделим индекс сапробности, который показывает загрязнение органическими веществами водного объекта и биотический индекс Ф. Вудивисса, основанный на уменьшении разнообразия фауны и характерном изменении состава макробентоса при увеличении загрязнения.

В итоге в качестве критериев на первом этапе были выбраны: УКИЗВ, индекс сапробности по Р. Пантле и Г. Букка (S) и биотический индекс Ф. Вудивисса.

Далее рассмотрим построение интегрального индекса на основе комплексных оценок. На втором этапе объединяют классификации выбранных критериев в одну.

На третьем этапе осуществляется перевод всех шкал (размерностей) критериев к единой следующем образом:

1. определение типа критериев:

- «прямой» критерий – чем больше их значение, тем лучше;
- «обратный» критерий – чем меньше их значение, тем лучше.

2. пересчет шкал критериев в диапазон от 0 до 1 (0 – наилучшее значение, 1 – наихудшее значение) по следующим формулам:

- для «прямого» критерия:

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

где q_i – преобразованное значение критерия; x_i – текущее значение критерия; \min_i – минимальное значение критерия; \max_i – максимальное значение критерия.

- для «обратного» критерия:

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

На четвертом этапе выбирается вид интегрального показателя $Q(q, p)$. Интегральный индекс строится таким образом, что зависит не только от показателей q_i , но и от их значимости, определяемой весовыми коэффициентами p_i , сумма которых должна равняться 1. В качестве выражения для интегрального показателя можно предложить линейную свертку показателей вида:

$$Q_i = \sum_{i=1}^n q_i \cdot p_i, \quad (3)$$

где n – число критериев оценивания.

На пятом этапе определяют значения весовых коэффициентов p_i с помощью экспертных оценок:

1. Метод ранжирования:

Рассмотрим задачу, когда имеется три критерия. Изначально проводят ранжирование критериев экспертами. Допустим следующие соотношение критериев и соответственно их весовых коэффициентов: $p_1 > p_2 > p_3$. Для определения самих значений коэффициентов важности воспользуемся следующей формулой, зависящей от порядкового номера критерия:

$$p_i = \frac{1}{i \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{i}\right)}. \quad (4)$$

Тогда $p_1=0,55$; $p_2=0,27$; $p_3=0,18$.

2. Метод парных сравнений:

Рассмотрим тот же случай когда $p_1 > p_2 > p_3$. Составим таблицу для сравнения важности критериев (K_i) (табл. 3).

Таблица 3

Сравнение трех критериев важности

K_i	K_1	K_2	K_3	v_i	p_i
K_1	x	1	1	2	0,67
K_2	0	x	1	1	0,33
K_3	0	0	x	0	0

При сравнении используются следующие условия: нет смысла сравнивать один и тот же критерий (x); если критерий расположенный по вертикали важ-

нее критерия, расположенного по горизонтали, то назначают 1 балл; если критерий расположенный по вертикали не важнее критерия, расположенного по горизонтали, то назначают 0 баллов. Далее по каждому критерию суммируют баллы и по формуле рассчитывают коэффициенты важности.

$$p_i = \frac{v_i}{\sum v_i}, \quad (5)$$

где v_i – суммарное количество баллов для каждого критерия.

Недостатком такого подхода является то, что численное значение коэффициента важности для третьего критерия $p_3=0$. Для того, чтобы это избежать вводится условный критерий с коэффициентом важности p_4^* . При этом: $p_1 > p_2 > p_3 > p_4^*$. Составляется новая таблица с учетом четвертого критерия, важность которого в итоге будет равна нулю (табл. 4).

Таблица 4

Сравнение четырех критериев важности

K_i	K_1	K_2	K_3	K_4^*	v_i	p_i
K_1	x	1	1	1	3	0,50
K_2	0	x	1	1	2	0,33
K_3	0	0	x	1	1	0,17
K_4^*	0	0	0	x	0	0

В случае если критерии равнозначны или невозможно определить их веса применяют для расчета коэффициента важности следующую формулу:

$$p_i = \frac{1}{n}, \quad (6)$$

где n – число критериев оценивания.

На шестом заключительном этапе выводится формула интегрального индекса используя уравнения 1-3, а затем рассчитываются граничные значения для составления новой классификации.

Представленный литературный обзор позволяет разработать новый интегральный индекс на основе комплексной оценки экологического состояния водных объектов.

Для расчета комплексных оценок была использована база данных экологического мониторинга северо-восточной части бассейна Финского залива. Наблюдения ведутся с 2001 года по настоящее время непосредственно авторами работы на базе ВШТЭ СПбГУПТД.

Исследуемые водные объекты расположены на территории г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области, были оцифрованы с помощью компьютерной программы ArcGIS 10.0. В геоинформационную систему (ГИС) занесены результаты мониторинга по 60 постоянным пунктам контроля качества воды.

Отбор проб, их анализ и полевые измерения ведутся в весенний, летний и осенний периоды по показателям и расчетным индексам, представленным в таблице 5.

Параметры, показатели и индексы качества воды

№ п/п	Показатель	№ п/п	Показатель	№ п/п	Показатель
1	Координаты пункта контроля (GPS)	12	Щелочность, мг-экв/дм ³	23	Концентрация O ₂ , мгO ₂ /дм ³ (%)
2	Температура воздуха (t _{возд}), °C	13	Концентрация Ca ²⁺ , мг/дм ³	24	Концентрация SO ₄ ²⁻ , мг/дм ³
3	Температура воды (t _{воды}), °C	14	Концентрация Mg ²⁺ , мг/дм ³	25	Биологическое потребление кислорода (БПК ₅), мгO ₂ /дм ³
4	Давление атм. воздуха, hPa	15	Жесткость общая, мг/дм ³	26	Индекс трофности водоемов (pH _{100%} либо ITS)
5	Запах, баллы	16	Перманганатная окисляемость, мгO ₂ /дм ³	27	Гидрохимический индекс загрязнения воды (ИЗВ)
6	Пенистость, +/-	17	Концентрация HCO ₃ ⁻ , мг/дм ³	28	Удельный комбинаторный индекс загрязнения воды (УКИЗВ)
7	Цветность, градусы	18	Концентрация Cl ⁻ , мг/дм ³	29	Олигохетный индекс Гуднайта и Уителяя (J)
8	Мутность, мг/дм ³	19	Концентрация Fe ³⁺ , мг/дм ³	30	Биотический индекс Ф. Вудивисса
9	Удельная электропроводность (УЭП), мкСм/см	20	Концентрация NO ₂ ⁻ , мг/дм ³	31	Индекс Шеннона (H)
10	Водородный показатель (pH), ед.pH	21	Концентрация NH ₄ ⁺ , мг/дм ³	32	Индекс сапробности по Р. Пантле и Г. Букка (S)
11	Кислотность, мг-экв/дм ³	22	Концентрация PO ₄ ³⁻ , мг/дм ³	33	Токсичность воды (методом биотестирования на инфузориях)

Так для расчета УКИЗВ в первую очередь выбирались лимитирующие индивидуальные показатели [3].

На основе метода сводных показателей была реализована комплексная оценка с учетом абиотической и биотической составляющих качества водных объектов на примере бассейна северо-восточной части Финского залива.

Используя формулы 1-3 был выведен многокритериальный индекс Q:

$$Q = \frac{1}{3} \cdot \left(1 + \frac{q_1}{11} + \frac{q_2}{4,5} - \frac{q_3}{10} \right) \quad (7)$$

где q₁ – удельный комбинаторный индекс загрязненности (УКИЗВ); q₂ – индекс сапробности по Р. Пантле и Г. Букку; q₃ – биотический индекс по Ф. Вудивиссу.

Далее была сформирована новая классификация качества воды по многокритериальному индексу Q, которая позволяет определить класс и характеристику качества воды. Результаты расчетов представлены в таблице 6.

Результаты расчетов индексов качества воды

Название водного объекта	Индексы качества воды			
	УКИЗВ	Сапробность по Р. Пантле и Г. Букку	Биотический индекс по Ф. Вудивиссу	Интегральный показатель качества Q
оз. Серебряное	2,37 (III)	1,56 (II)	3,37 (III)	0,41 (II)
оз. Гладышевское	2,43 (III)	1,45 (I)	2,5 (IV)	0,43 (III)
р. Гладышевка	2,11 (III)	1,69 (II)	2,5 (IV)	0,44 (III)
р. Рощинка	3,76 (III)	1,7 (II)	1,67 (IV)	0,52 (III)
р. Черная	3,39 (III)	1,74 (II)	1,94 (IV)	0,50 (III)
р. Приветная	4,27 (IV)	1,74 (II)	2,07 (IV)	0,52 (III)
ручей Смолячков	6,45 (IV)	1,86 (II)	2,82 (IV)	0,57 (III)
Сестрорецкое водохр.	3,32 (III)	1,6 (II)	2,27 (IV)	0,48 (III)
р. Малая Сестра	4,23 (IV)	1,59 (II)	2,44 (IV)	0,50 (III)

Интегральный показатель Q может быть использован для: определения качественной характеристики водных объектов; сопоставления результатов в динамике; сравнения водохозяйственных участков, водных объектов и бассейна в целом по мощности воздействия; определения нагрузки на водный объект; выявления источников загрязнений; бассейнового нормирования техногенной нагрузки.

Разработанный индекс позволил обобщить данные собственных многолетних полевых исследований в бассейне р. Черная, р. Приветная, Северного побережья Финского залива.

Комплексный подход с использованием многокритериального индекса на основе мониторинга водных объектов является одним из механизмов управления водопользованием, а именно использование разработанного индекса возможно при нормировании нагрузки на водный бассейн. Предложенный подход в работе может быть использован для речных бассейнов Сибири.

Библиографический список

1. Дмитриев В.В., Фрумин Г.Т. Экологическое нормирование и устойчивость природных систем. – СПб.: Наука, 2004. – 294 с.
2. Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. – Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. – 463 с.
3. Кушнеров А.И., М.С. Строганова, А.И. Шишкин Выявление лимитирующих показателей, определяющих экологическое состояние водных объектов Всеволожского района Ленинградской области // Экологическое краеведение: мат. научно-практ. конф. / отв. ред. О.С. Козловцева. – Ишим: Изд-во ИПИ им. П.П. Ершова, 2016. – С. 251-256.