

Функции желательности Харрингтона для оценки качества природных вод

Э. С. Бикбулатов, И. Э. Степанова

Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, пос. Борок, Некоузский район, Ярославская обл, Россия

Поступила 22 июня 2011 г.

Проведен теоретический анализ возможностей применения функции желательности Харрингтона к оценке состояния природных экосистем. Показано, что для оценки качества воды водных объектов необходимо использовать исключительно функцию желательности с двусторонним ограничением. Она позволяет устранить полный произвол при установлении количества классов качества при различных способах оптимизации (типизации, классификации и т.п.) информации и приводит к математически обоснованному ограничению их числа с максимально 5 типами первого уровня. Подчеркивается, что если хотя бы один частный отклик или частная функция желательности не удовлетворяет предъявляемым требованиям, то, как бы ни были хороши другие параметры (свойства) исследуемой системы, общая оценка должна считаться неудовлетворительной. Составлены таблицы, дающие возможность по результатам последующих измерений произвести оценку современного состояния экосистемы Рыбинского водохранилища по биогенным элементам и органическому веществу. Отмечается необходимость учета сезонности гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических процессов для более точной оценки качества вод на конкретный момент времени в заданной точке акватории Рыбинского водохранилища.

Ключевые слова: водохранилища, качество воды, экологические нормы

ВВЕДЕНИЕ.

Существует множество подходов к оценке качества воды природных гидросистем - гидрофизические, гидрохимические, гидробиологические, экологические [1-6]. Каждый из них опирается на собственную систему показателей. Проведенная систематизация химических ингредиентов и показателей качества поверхностных вод показала, что их условно можно подразделить на натуральные и относительные. При этом под натуральными понимаются показатели, получаемые путем прямых измерений, а под оценочными — результаты преобразования аналитических данных тем или иным способом [7]. Натуральные показатели (возможно, лучше назвать аналитические), обладая наивысшей степенью конкретности, далеко не всегда способствуют прямой оценке степени загрязнения или качества вод, поскольку последние принципиально многозначны и существенно зависят от водопотребителя, т.е. отношения субъекта к объекту. Под водопотре-

бителем здесь понимается не только человек, но и масса всех других живых существ, в том числе гидробионтов. Задание или экспериментальное получение меры, относительно которой будет проводиться оценка, является характерной чертой прямого использования натуральных показателей в исследованиях природных экосистем. Наиболее разработанной и чаще всего используемой мерой в гидрохимии является предельно допустимая концентрация (ПДК) того или иного компонента в водной среде, по которой и проводится нормировка. Однако система ПДК давно и обоснованно подвергается аргументированной критике [2,6]. В частности ПДК:

1. не применимы для всех водоемов в различных географических зонах, для различных водных масс одного и того же водоема и даже для разных сезонов. Особенно это касается тех компонентов, которые формируют состав воды водоемов и водотоков в естественных условиях;

2. ограничение содержания компонентов идет только сверху, т.е. неявно предполагается, что если водоем содержал бы дистиллированную воду, то считался бы идеальным;

3. возникают большие логические трудности с переводом множества полученных экспериментальным путем количественных значений в качественные шкалы, в связи с чем различные авторы предлагают от 3 до 12 градаций лингвистических (словесных) оценок типологии первого уровня [8].

Высказано мнение, что «недостатки концепции ПДК ставят под сомнение дееспособность существующего экологического контроля — методов диагностики, нормирования, прогноза, управления, а вместе с ними — экономических, правовых и социальных инструментов природоохранной деятельности» [3]. Таким образом, указывается на неудовлетворительность использования в повседневной практике базирующихся на концепции ПДК предложенных ранее комплексных показателей качества вод, таких как КИСС (комплексный индекс состояния среды), ИЗВ (индекс загрязнения воды), УКИЗВ (удельный комбинаторный индекс загрязнения воды) и подобных им индексов.

В последние годы для оценок качества воды по гидрофизическим, гидрохимическим и гидробиологическим показателям в употребление вошли различные виды функции желательности (ФЖ) [1, 3].

Целью работы является формирование универсальных таблиц для оценки уровня экологической безопасности содержания биогенных элементов и органического вещества в Рыбинском водохранилище на основе ФЖ, предложенной Харрингтоном [9,10].

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.

Как было отмечено выше, система ПДК давно и обоснованно подвергается аргументированной критике. В то же время критика справедлива по отношению к главным компонентам солевого состава, большей части биогенных элементов, содержания природных органических и неорганических веществ. Для загрязняющих веществ — ксенобиотиков, по нашему мнению, разработанная система ПДК, несмотря на критику, пока остается единственной достаточно обоснованной системой для оценки пригодности воды для различных видов водопользования. Интенсивно развиваемая в

последние годы биотическая концепция контроля природной среды на основе экологически допустимых уровней (ЭДУ) [3] еще не получила широкого признания. В дальнейшем мы сосредоточим внимание на элементах и соединениях, определяющих качество природной воды, не подверженной значительному загрязнению. Именно для анализа таких компонентов наиболее приемлемо использование ФЖ, хотя и для антропогенных соединений ее применение также обосновано.

В [11] приведены все основные функции принадлежности, которые в нашем случае как по форме, так и своему смысловому содержанию фактически эквивалентны ФЖ. Указанными авторами подчеркивается, что при решении многокритериальных задач и построении обобщенного показателя одним из наиболее удобных способов представления информации является обобщенная функция желательности Харрингтона. Указанная функция обладает настолько замечательными свойствами, что используется при решении широчайшего круга задач в самых различных областях знания — от частных практических приложений до общих классификационных проблем целых наук - географии, экономики, экологии и др. Достаточно в интернете в любой поисковой системе в соответствующей строке набрать «функция желательности Харрингтона», чтобы увидеть более тысячи сайтов на заданную тему.

Частная функция желательности Харрингтона (d_i) имеет вид:

$$d_i = \exp(-\exp\{-x_i\}), 0 \leq d_i \leq 1,$$

где x_i — кодированное значение i-го показателя, т.е. его значение в условном масштабе.

Эта функция предоставляет возможность получения значений желательностей 4-мя способами [3]:

1. через указание наиболее желательного значения параметра на основе вида эмпирической функции его распределения;
2. по левой и правой границам диапазона желательных значений;
3. по левой границе и месту расположения оптимальной желательности;
4. по правой границе и месту расположения оптимальной желательности.

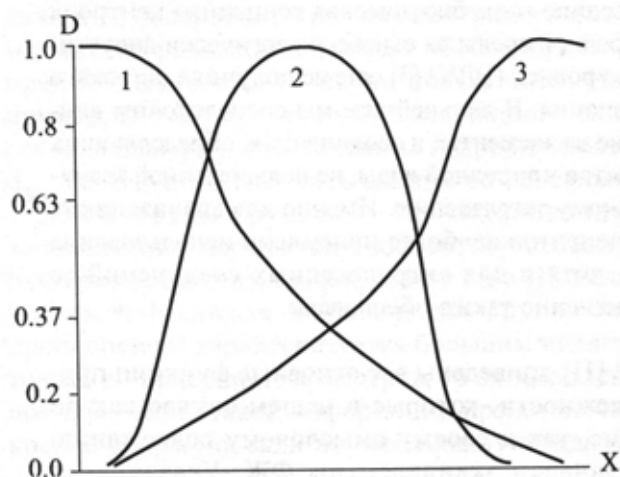


Рис. 1. Функция желательности для односторонних (1, 3) и двусторонних (2) ограничений на параметр оптимизации

Если исключить из рассмотрения построение ФЖ через эмпирические функции распределения, которые могут быть исключительно разнообразными в зависимости от характера конкретной задачи, то остальные виды функций желательности Харрингтона можно отобразить на одном графике (рис. 1).

Приведенные на рисунке кривые обладают такими полезными свойствами как непрерывность, монотонность и гладкость. Функция Харрингтона имеет несколько критических точек — точек перегиба, которые имеют ординаты 0.8; 0.63; 0.37; 0.2 [12]. К ним необходимо добавить еще две характерные точки — точки минимума и максимума функции. Последняя из них является естественной точкой перегиба при ординате 1.0 для наиболее общей ФЖ Харрингтона, т.е. функции с двусторонним ограничением на параметр оптимизации. Все вместе они задают стандартные отметки на шкале желательности: «очень хорошо» (1.00–0.80), «хорошо» (0.80–0.63), «удовлетворительно» (0.63–0.37), «плохо» (0.37–0.20), «очень плохо» (0.20–0.00). Таким образом, точки перегиба ФЖ

можно принять за границы классов и тем самым устранить полный произвол при установлении количества классов при различных способах оптимизации (типизации, классификации и т.п.).

Функция желательности, принимающая значения в диапазоне (0–1), характеризует перевод количественного значения конкретного показателя в оценку желательности (предпочтительности) определенного состояния оцениваемого объекта (в нашем случае — экологической безопасности содержания ряда химических компонентов). Среди конкретных способов реализации функции желательности для соответствующей оценки выбрана психофизическая шкала Харрингтона, имеющая универсальное применение (табл. 1). Числовая система предпочтений, представленная в этой таблице, является безразмерной.

Назначение шкалы заключается в установлении соответствия между физическими и психологическими параметрами. Под физическими следует понимать все кодированные значения измеряемых параметров, характеризующих функционирование исследуемого объекта, а под психологическими — чисто субъективные оценки исследователя, которые на шкале желательности могут быть выражены через баллы или лингвистические системы оценки. При отсутствии достаточного массива надежных экспериментальных данных для достаточно грубой оценки (первое приближение) целесообразно построение трехинтервальной шкалы качества (табл. 1; 3 и 4 столбцы).

Для того чтобы использовать данный метод при оценке и выборе оптимального варианта решения, в первую очередь необходимо выработать механизмы преобразования количественных значений измеренных показателей в уровни желательности на шкале Харрингтона. Этот механизм должен предусматривать установление нижней и верхней границ исходных показателей,

Таблица 1. Психофизическая шкала Харрингтона (первые два столбца) с нашими дополнениями.

Лингвистическая оценка	Интервалы значений функции желательности		Лингвистическая оценка
Очень хорошо	1.00-0.80	1.00-0.63	Хорошее качество
Хорошо	0.80-0.63		
Удовлетворительно	0.63-0.37	0.63-0.37	Среднее качество
Плохо	0.37-0.20	0.37-0.00	Низкое качество
Очень плохо	0.20-0.00		

соответствующих области «удовлетворительно» и выше. Выбор этих границ весьма произволен и во многом зависит от квалификации исследователей. В [3] приведен пример их выбора для переменной БПК₅. Авторы цитируемой работы отмечают, что «в этом примере произвольно взято значение $X_{лев} = 1.953$. Для правой границы взято значение $X_{прав} = 5.122$ в соответствии с 6-балльным классификатором качества вод по гидрохимическим показателям [6]». Приведенное значение для правой границы соответствует благополучному классу качества вод по БПК₅. Для простой иллюстрации эти предположения вполне допустимы, но для корректного описания экосистемы явно недостаточны.

Механизм преобразования количественных значений измеренных показателей с целью установления экологического благополучия водоема в уровни желательности на шкале Харрингтона должен базироваться на достаточно строгих математических предпосылках.

Поскольку функция Харрингтона является симметричной [12, 13], то оптимальное значение признака равно среднему арифметическому. Поэтому в нашем, да и в общем, случае полный произвол в выборе двусторонних границ в значительной мере может быть устранен применением среднеарифметических значений (X_{cp}) с учетом их стандартного или среднеквадратического отклонения [14], наиболее распространенного показателя рассеивания значений случайной величины относительно её математического ожидания. Среднее квадратическое отклонение (σ) играет важную роль в анализе вариационных рядов распределения. Напомним, что в условиях нормального или симметричного распределения, существуют следующие взаимосвязи между величиной среднего квадратического отклонения и количеством наблюдений:

1. В пределах ($X_{cp} + 1\sigma$) располагается 0.683, или 68.3% общего количества наблюдений;
2. В пределах ($X_{cp} + 2\sigma$) — 0.954, или 95.4%;
3. В пределах ($X_{cp} + 3\sigma$) — 0.997, или 99.7% количества наблюдений.

На практике почти не встречаются отклонения, которые превышают $+3\sigma$, поэтому такое отклонение обычно считается максимально возможным (правило трех сигм). При условии, что величина истинная, а не полученная в результате обработки выборки.

Среднее квадратическое отклонение, как и среднее линейное отклонение, показывает абсолютное отклонение измеренных значений от среднеарифметического, т.е. на сколько в среднем отклоняются конкретные варианты признака от среднего значения. Они выражаются в тех же единицах измерения, что и признаки (в мг л⁻¹, м, гр. и т.д.).

Тогда, с учетом вышесказанного, для оценки благополучия системы по конкретному исходному показателю (при наличии достаточно представительного ряда измерений), за правую границу ($x_{прав}$), соответствующей области «удовлетворительно» и выше, можно принять среднеарифметическое плюс среднеквадратическое ($x_{cp} + \sigma$), а за левую ($x_{лев}$) — среднеарифметическое минус среднеквадратическое ($x_{cp} - \sigma$). Если диапазон желательных результатов измерений рассматриваемой величины определяется значениями $x_{прав}$ и $x_{лев}$, то для построения ФЖ Харрингтона по месту расположения левой и правой границ необходимо ввести вспомогательную функцию от «х»:

$$\rightarrow z(x) = (2x - x_{лев} - x_{прав}) / (x_{прав} - x_{лев}).$$

Тогда желательность каждого компонента в точке «х» будет вычисляться по формуле [3]:

$$d_i = \exp(-z^2(x)).$$

После того как все частные параметры будут переведены в свои безразмерные желательности, можно приступить к построению общего параметра оценки, т.е. обобщенной функции желательности Харрингтона. Обобщенная функция желательности является некоторым абстрактным построением. При этом необходимо отметить, что выбор вида функции зависит от ряда субъективных факторов, которые обязательно присутствуют, поскольку выбор осуществляется лицом, принимающим решение. Одним из наиболее употребляющихся в практике способов решения задачи является представление ее в виде средней геометрической частных желательностей:

$$\sqrt[n]{\prod_{i=1}^n d_i} = \sqrt[n]{d_1 d_2 d_3 \dots d_n},$$

где d_i - частная функция желательности, n - число показателей.

Крайним проявлением такого интегрального подхода для оценки состояния водных экосистем

является построение среднегеометрической из множества разнообразных уже обобщенных по предметным областям науки показателей. Например, $D = \sqrt{d_{хим} d_{биол}}$, причем «для полного описания экологического состояния гидробиоценоза $d_{биол}$ необходимо получить данные по основным экологическим группам — фитопланктону, зоопланктону, перифитону, зообентосу, нектону, бактериопланктону, макрофитам и т.д.» [1]. Если учесть, что каждая экологическая группа гидробиоценоза характеризуется большим числом только ей присущих параметров, то одновременное получение такой информации представляет крайне сложную, если не невозможную задачу.

Известно, что выбор вида степенного среднего показателя оказывает существенное влияние на его численную величину. Геометрическая средняя величина дает наиболее точный результат осреднения, если задача состоит в нахождении такого значения признака, который качественно был бы равноудален как от максимального, так и от минимального значения признака.

Возможно, при построении обобщенной ФЖ в ряде случаев целесообразнее использовать среднюю арифметическую величину, поскольку она не сильно зависит от сравнительно небольшого количества малых значений частных функций.

Наиболее часто используемый способ задания обобщенной ФЖ (по среднегеометрической) таков, что если хотя бы одна из переменных $d_i = 0$, то и $D = 0$. Для исключения нулевых значений можно использовать различные подходы, например, прием с «условными» границами, отличающимися от реальных на определенное количество процентов в каждом случае. В целом, обобщенная ФЖ весьма чувствительна к малым значениям частных желательностей. Отсюда неизбежно следует, что если хотя бы один частный отклик не удовлетворяет предъявляемым требованиям, то, как бы ни были хороши другие параметры (свойства) исследуемой системы, общая оценка должна считаться неудовлетворительной. Это положение будет справедливым даже в случае, если рассчитанная по множеству показателей обобщенная ФЖ будет находиться в диапазоне приемлемых значений. Весьма показательный пример по обсуждаемой проблеме приводится в работе [13]. «Предположим, один абитуриент получил по разным предметам следующие экзаменационные оценки: 5, 5, 5, 5, 2. Совершенно очевидно, что общий итог неудовлетворителен — абитуриент даже не участвовал в конкурсе. В то же время сумма набранных баллов у него

очень высокая (она равна 22) и больше, чем для абитуриента, который получил по всем предметам 4. В действительности, даже абитуриент, который получил по всем предметам 3 (наименьшие положительные оценки), находится в более выгодном положении — он участвует в конкурсе и сохраняет некоторые шансы на успех».

Аналогичные ситуации могут часто возникать при экологических оценках качества водных экосистем. Например, некоторая природная вода по всем показателям, кроме одной — высокой радиоактивности, может характеризоваться как имеющая отличное качество. Обобщенная функция желательности (среднегеометрическая частных функций) в данном гипотетическом примере также может указывать на ее хорошее качество. Такая же оценка относится к этой воде и при использовании так называемых комплексных, интегральных и т.п. показателей. Однако общая экспертная оценка неизбежно будет выводить ее на уровень крайне опасного продукта для большинства видов водопользования. В целом, если хотя бы один из многих десятков общепринятых показателей качества воды будет указывать на ее непригодность для того или иного вида водопользования, то она должна считаться ненадлежащего качества. Отсюда неизбежно следует, что необходимо весьма осторожно подходить к опубликованным результатам оценок качества воды исключительно на основании часто неоправданно широких обобщений всех ее частных показателей. При подобных способах оценки качества объектов, на наш взгляд, необходимо всегда параллельно указывать на конкретные показатели, по которым они считаются неудовлетворительными. Поэтому, наряду с обобщенной ФЖ, целесообразно, если не сказать необходимо, параллельно указать и на частные ФЖ, по которым предмет или система обязаны считаться не соответствующими установленным или принятым нормам. В противном случае отсутствие или недостаток подобной информации может негативно отразиться на качестве административных управленческих документов при решении вопросов использования конкретных водных объектов для того или иного вида водопользования, а также вмешательства или невмешательства в естественный ход их развития (реставрации или реконструкции) водных (и не только) экосистем.

Рассмотрим с изложенных позиций полученные нами материалы по Рыбинскому водохранилищу — одному из крупнейших водоемов Волжско-Камского каскада.

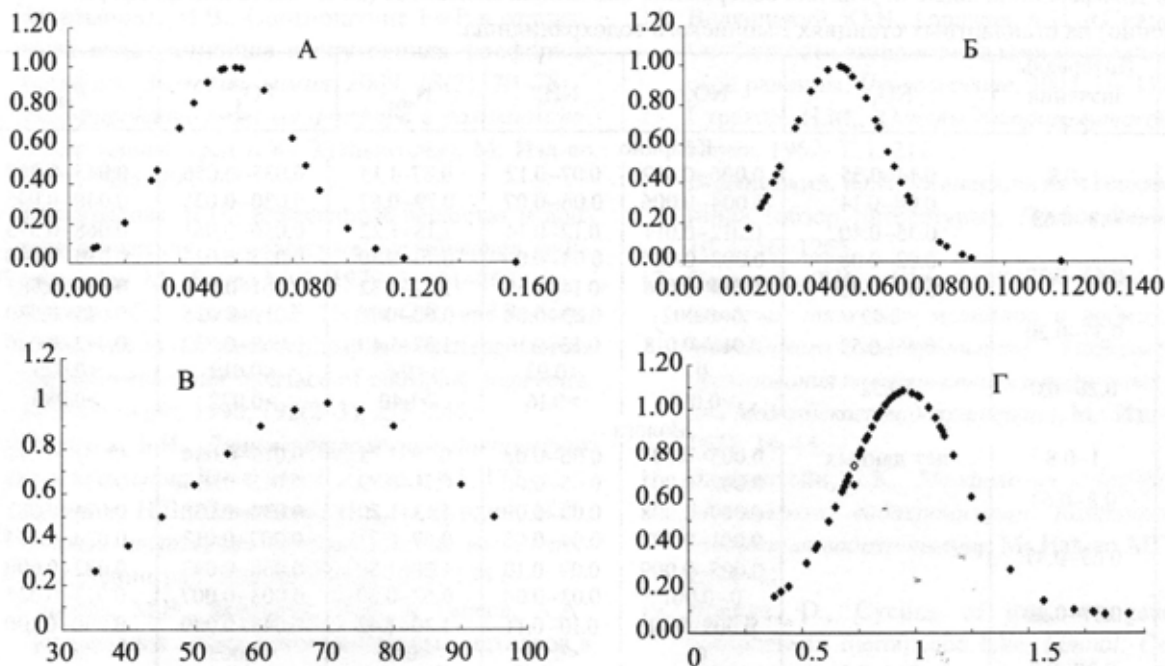


Рис. 2. Функции желательности для некоторых переменных, построенные по информации о левой и правой границах оптимального диапазона. А — аммиак на станции Средний Двор, мг·л⁻¹; Б — общий фосфор на станции Измайлово, мг·л⁻¹; В — цветность на станции Наволок, градусы хромокобальтовой шкалы; Г — общий азот на станции Молога, мг·л⁻¹.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.

Материалы собирались в течение многих лет на 6-ти стандартных станциях Рыбинского водохранилища, которые позволяют характеризовать как отдельные плесы, так и весь водоем в целом. Схема станций приведена в монографии [15]. Анализы на содержание ионов аммония, нитритов, нитратов, фосфатов и БПК₅ проводились на борту экспедиционного судна в специально оборудованной лаборатории. Величины химического потребления кислорода (ХПК), содержания общих форм азота и фосфора, а также органического углерода (C_{орг}) устанавливались в береговой лаборатории из консервированных серной кислотой и хранившихся до анализа в холодильнике не более 3-х суток проб. Применялись стандартные аттестованные методы анализа. Исходные ряды наблюдений варьировали по разным показателям от 40 до 60 единиц и охватывали период с 2001 по 2009 гг. Математическую обработку результатов анализов вели с использованием ФЖ Харрингтона, позволяющей перейти к безразмерным величинам и оценивать результаты по единой шкале.

Выбранный таким образом оптимальный диапазон значений параметра позволяет наглядно отразить конкретную ситуацию в водоеме. В качестве примера приводим графики для ряда

показателей биогенных элементов и органического вещества (Рис. 2).

Для переменной ХПК соответствующий график приводился нами ранее [16].

Основываясь на подобных графиках, были рассчитаны диапазоны значений параметров, в которых экосистема находилась в том или ином состоянии. Составлены таблицы, которые дают возможность по результатам последующих измерений сразу произвести оценку современного состояния экосистемы по биогенным элементам и органическому веществу (Табл. 2 и 3).

Здесь приведены полные таблицы в соответствии с психофизической шкалой Харрингтона. Возможно, при оценках качества природных вод, достаточно ориентироваться на таблицы, полученные с использованием приведенной выше трехинтервальной шкалы. Соответствующие сокращенные таблицы для обсуждаемых показателей воды Рыбинского водохранилища легко составить на основании приведенных в табл. 2 и +3 материалов. Отметим, что заметное количество экспериментальных данных попадает в разряд «плохо» и «очень плохо». Вряд ли такое положение можно принять за истину в последней инстанции. Действительно, исходный массив

Таблица 2. Дифференциальные нормы для содержания биогенных элементов ($\text{мг}\cdot\text{л}^{-1}$ азота или фосфора соответственно) на стандартных станциях Рыбинского водохранилища.

Оценка	Интервалы значений ФЖ	NO_3^-	NO_2^-	NH_4^+	$\text{N}_{\text{общ}}$	PO_4^{3-}	$\text{P}_{\text{общ}}$
Коприно							
Оч. хор.	1–0.8	0.14–0.35	0.006–0.012	0.07–0.12	0.87–1.15	0.035–0.056	0.045–0.068
Хорошо	0.8–0.63	0.08–0.14	0.004–0.006	0.06–0.07	0.79–0.87	0.030–0.035	0.040–0.045
		0.35–0.40	0.012–0.014	0.12–0.14	1.15–1.22	0.056–0.061	0.068–0.073
Удовл.	0.63–0.37	0.02–0.08	0.002–0.004	0.04–0.06	0.70–0.79	0.025–0.035	0.030–0.040
		0.40–0.45	0.014–0.016	0.14–0.15	1.22–1.32	0.061–0.068	0.073–0.083
Плохо	0.37–0.20	<0.02	0–0.002	0.03–0.04	0.60–0.70	0.019–0.025	0.025–0.030
		0.45–0.52	0.016–0.018	0.15–0.16	1.32–1.40	0.068–0.072	0.072–0.086
Оч. пл.	0.20–0.0	>0.52	0	<0.03	<0.6	<0.019	<0.025
			>0.018	>0.16	>1.40	>0.072	>0.086
Молога							
Оч.хор.	1–0.8	нет данных	0.003–0.007	0.06–0.08	0.79–1.13	0.016–0.034	0.041–0.074
Хорошо	0.8–0.63		0.002–0.003	0.05–0.06	0.71–0.79	0.013–0.016	0.034–0.041
			0.007–0.008	0.08–0.09	1.13–1.20	0.034–0.038	0.074–0.082
Удовл.	0.63–0.37		0.001–0.002	0.04–0.05	0.59–0.71	0.007–0.013	0.024–0.034
			0.008–0.009	0.09–0.10	1.20–1.30	0.038–0.043	0.082–0.090
Плохо	0.37–0.20		0–0.001	0.03–0.04	0.52–0.59	0.003–0.007	0.013–0.024
			0.009–0.01	0.10–0.11	1.30–1.42	0.043–0.049	0.090–0.100
Оч. пл.	0.20–0.0		0	<0.03	<0.52	<0.003	<0.013
			>0.01	>0.11	>1.42	>0.049	>0.100
Наволоок							
Оч.хор.	1–0.8	0.080–0.200	0.002–0.006	0.05–0.07	0.65–1.22	0.010–0.020	0.034–0.055
Хорошо	0.8–0.63	0.052–0.080	0.001–0.002	0.04–0.05	0.48–0.65	0.008–0.010	0.022–0.029
		0.200–0.220	0.006–0.007	0.07–0.08	1.22–1.38	0.020–0.023	0.055–0.060
Удовл.	0.63–0.37	0.020–0.052	0–0.001	0.03–0.04	0.34–0.48	0.005–0.008	0.029–0.034
		0.220–0.250	0.007–0.008	0.08–0.09	1.38–1.47	0.023–0.026	0.060–0.068
Плохо	0.37–0.20	0.002–0.020	0.008–0.009	0.02–0.03	0.30–0.34	0.003–0.005	0.018–0.029
		0.250–0.290		0.09–0.10	1.47–1.70	0.026–0.028	0.068–0.072
Оч. пл.	0.20–0.0	0–0.002	>0.009	<0.02	<0.30	<0.003	<0.018
		>0.290		>0.10	>1.70	>0.028	>0.072
Измайлово							
Оч.хор.	1–0.8	0.084–0.190	0.002–0.006	0.04–0.07	0.71–1.02	0.009–0.018	0.038–0.058
Хорошо	0.8–0.63	0.060–0.084	0.001–0.007	0.03–0.08	0.64–0.71	0.006–0.009	0.031–0.038
		0.19–0.022		0.08–0.09	1.02–1.18	0.018–0.020	0.059–0.062
Удовл.	0.63–0.37	0.030–0.060	0–0.001	0.02–0.03	0.54–0.64	0.004–0.006	0.028–0.031
		0.022–0.024	0.007–0.008	0.09–0.10	1.18–1.25	0.020–0.022	0.062–0.068
Плохо	0.37–0.20	0.005–0.030	0.008–0.009	0.01–0.02	0.45–0.54	0–0.004	0.020–0.028
		0.240–0.280		0.10–0.11	1.25–1.35	0.022–0.025	0.068–0.072
Оч. пл.	0.20–0.0	<0.005	>0.009	<0.01	<0.45	>0.025	<0.020
		>0.280		>0.11	>1.35		>0.072
Ср. Двор							
Оч.хор.	1–0.8	0.070–0.18	0.002–0.006	0.05–0.07	0.71–1.12	0.010–0.018	0.037–0.061
Хорошо	0.8–0.63	0.050–0.070	0.001–0.002	0.04–0.05	0.62–0.71	0.008–0.010	0.032–0.037
		0.180–0.210	0.006–0.007	0.07–0.08	1.12–1.20	0.018–0.021	0.061–0.067
Удовл.	0.63–0.37	0.016–0.050	0–0.001	0.03–0.04	0.50–0.62	0.005–0.008	0.024–0.032
		0.210–0.240	0.007–0.008	0.08–0.09	1.20–1.32	0.021–0.023	0.067–0.075
Плохо	0.37–0.20	0–0.016	0.008–0.009	0.02–0.03	0.38–0.50	0.003–0.005	0.020–0.024
		0.240–0.270		0.09–0.10	1.32–1.50	0.023–0.025	0.075–0.080
Оч. пл.	0.20–0.0	>0.270	>0.009	<0.02	<0.38	<0.003	<0.020
				>0.10	>1.50	>0.025	>0.024
Брейтово							
Оч.хор.	1–0.8	0.063–0.170	0.003–0.007	0.05–0.07	0.81–1.08	0.010–0.022	0.044–0.060
Хорошо	0.8–0.63	0.041–0.063	0.002–0.003	0.04–0.05	0.73–0.81	0.008–0.010	0.040–0.044
		0.170–0.190	0.007–0.008	0.07–0.08	1.08–1.14	0.022–0.024	0.060–0.065
Удовл.	0.63–0.37	0.002–0.041	0.001–0.002	0.03–0.04	0.66–0.73	0.004–0.008	0.034–0.040
		0.190–0.210	0.008–0.009	0.08–0.09	1.14–1.22	0.024–0.028	0.065–0.070
Плохо	0.37–0.20	0–0.002	0–0.001	0.02–0.03	0.58–0.66	0.002–0.004	0.029–0.034
		0.210–0.260	0.009–0.010	0.09–0.10	1.22–1.30	0.028–0.032	0.070–0.076
Оч. пл.	0.20–0.0	>0.260	>0.010	<0.02	<0.58	<0.002	<0.029
				>0.10	>1.30	>0.032	>0.076

Таблица 3. Значения функции желательности показателей органического вещества на стандартных станциях Рыбинского водохранилища.

Лингвистическая оценка	Интервалы значений ФЖ	БПК ₅	ХПК	Цветность	C _{орг}
Наволоч					
Очень хорошо	1-0.8	1.07-1.45	33.8-39.4	50-65	12.9-15.0
Хорошо	0.8-0.63	0.98-1.07	32.7-33.8	46-50	12.4-12.9
Удовлетворительно	0.63-0.37	1.45-1.52	39.4-40.7	65-68	15.0-15.6
		0.85-0.98	31.5-32.7	40-46	11.8-12.4
Плохо	0.37-0.20	1.52-1.65	40.7-42.2	68-73	15.6-16.3
		0.75-0.85	29.5-31.5	38-40	11.2-11.8
Очень плохо	0.20-0.0	1.65-1.80	42.2-43.5	73-75	16.3-16.8
		<0.75	<29.5	<38	<11.2
		>1.80	>43.5	>75	>16.8
Коприно					
Очень хорошо	1-0.8	1.12-1.50	30.6-35.0	50-63	11.2-13.2
Хорошо	0.8-0.63	1.03-1.12	29.7-30.6	46-50	10.9-11.2
Удовлетворительно	0.63-0.37	1.50-1.63	35.0-36.3	63-67	13.2-13.6
		0.89-1.03	28.1-29.7	42-46	10.0-10.9
Плохо	0.37-0.20	1.63-1.80	36.3-37.4	67-72	13.6-14.4
		0.72-0.89	26.8-28.1	38-42	9.5-10.0
Очень плохо	0.20-0.0	1.80-1.90	37.4-38.8	72-75	14.4-14.9
		<0.72	<26.8	<38	<9.5
		>1.90	>38.8	>75	>14.9
Молога					
Очень хорошо	1-0.8	1.17-1.98	31.6-36.3	49-61	12.3-15.0
Хорошо	0.8-0.63	0.99-1.17	30.8-31.6	47-49	11.8-12.3
Удовлетворительно	0.63-0.37	1.98-2.15	36.3-38.0	61-64	15.0-15.5
		0.73-0.99	29.0-30.8	42-47	10.8-11.8
Плохо	0.37-0.20	2.15-2.42	38.0-38.9	64-68	15.5-16.3
		0.50-0.73	27.6-29.0	40-42	10.1-10.8
Очень плохо	0.20-0.0	2.42-2.70	38.9-40.1	40-42	16.3-17.1
		<0.50	<27.6	<40	<10.1
		>2.70	>40.1	>68	>17.1
Измайлово					
Очень хорошо	1-0.8	1.05-1.52	34.3-39.2	49-64	12.6-14.9
Хорошо	0.8-0.63	0.93-1.05	33.1-34.3	46-49	12.2-12.6
Удовлетворительно	0.63-0.37	1.52-1.62	39.2-40.2	64-68	14.9-15.4
		0.78-0.93	31.5-33.1	43-46	11.6-12.2
Плохо	0.37-0.20	1.62-1.80	40.2-42.0	68-72	15.4-16.0
		0.62-0.78	30.0-31.5	36-43	10.9-11.6
Очень плохо	0.20-0.0	1.80-1.93	42.0-43.3	72-78	16.0-16.7
		<0.62	<30.0	<36	<10.9
		>1.93	>43.3	>78	>16.7
Средний Двор					
Очень хорошо	1-0.8	1.05-1.59	33.9-39.2	49-65	12.8-15.1
Хорошо	0.8-0.63	0.92-1.05	32.6-33.9	46-49	12.2-12.8
Удовлетворительно	0.63-0.37	1.59-1.72	39.2-40.8	65-69	15.1-15.5
		0.71-0.92	30.7-39.2	42-46	11.4-12.2
Плохо	0.37-0.20	1.72-1.87	40.8-42.6	69-74	15.5-16.4
		0.59-0.71	28.9-30.7	36-42	10.6-11.4
Очень плохо	0.20-0.0	1.87-2.01	42.6-44.8	74-79	16.4-17.0
		<0.59	<28.9	<36	<10.6
		>2.01	>44.8	>79	>17.0
Брейтово					
Очень хорошо	1-0.8	1.24-1.64	34.9-40.4	55-74	13.4-16.1
Хорошо	0.8-0.63	1.13-1.24	33.7-34.9	51-55	12.7-13.4
Удовлетворительно	0.63-0.37	1.64-1.82	40.4-41.6	74-79	16.1-16.8
		0.94-1.13	31.8-33.7	44-51	11.8-12.7
Плохо	0.37-0.20	1.82-1.97	41.6-43.5	79-86	16.8-17.7
		0.83-0.94	30.4-31.8	39-44	11.0-11.8
Очень плохо	0.20-0.0	1.97-2.10	43.5-45.1	86-90	17.7-18.5
		<0.83	<30.4	<39	<11.0
		>2.10	>45.1	>90	>18.5

экспериментальных данных относится ко всему периоду открытой воды — от ранней весны до глубокой осени. Ясно, что оптимальные значения измеренных параметров для разных гидрологических фаз в жизни водоема могут сильно различаться. Ситуация в летний межень период не адекватна ситуации периода весеннего половодья и тем более зимнего и осеннего периодов. Поэтому следующим шагом в обсуждаемом направлении оценки состояния экосистем должен быть учет указанных гидрологических факторов. Для этого необходимо иметь большее количество экспериментальных данных для конкретных сезонов (отдельно весна, лето, осень, зима) с тем, чтобы избежать недостаточно обоснованных заключений о качестве воды природных водоемов на данный момент времени.

Чтобы избежать возможных противоречий при оценке качества воды Рыбинского водохранилища на данный момент времени по интегральным показателям, в частности, по обобщенной ФЖ Харрингтона, или дифференциальным показателям, например, по частным функциям желательности, мы полагаем целесообразным на основании многолетних исследований составить таблицы ФЖ для конкретных компонентов данной экосистемы с учетом сезонности и в дальнейших оценках ориентироваться на них.

Проведенная работа позволяет устранить многие указанные выше недостатки подходов к оценке состояния экосистем. Подобные психофизические таблицы могут быть составлены также для гидрофизических и гидробиологических параметров. Они будут иметь фундаментальное значение при оценках нормы и патологии экосистем.

ВЫВОДЫ

Проведенный теоретический анализ функции желательности Харрингтона, используемой для оценки состояния экосистем, показывает, что она позволяет устранить полный произвол при установлении количества классов качества при различных способах оптимизации (типизации, классификации и т.п.). Для этого используются естественные свойства данной функции — 4 точки перегиба в совокупности с ее экстремумами, которые приводят к ограничению количества классов до 5-ти.

Для ряда специфических случаев предложено использовать 3-х интервальную психофизическую шкалу оценки качества вод, вместо исходной 5-ти интервальной.

Показано, что для оценки качества водных объектов необходимо использовать исключительно функцию желательности с двусторонним ограничением. Применение односторонних функций может приводить к парадоксальным результатам. Например, наиболее экологически чистым водоемом должен был бы считаться водоем с дистиллированной водой.

Показано, что если хотя бы один частный отклик или частная функция желательности не удовлетворяет предъявляемым требованиям, то, как бы ни были хороши другие параметры (свойства) исследуемой системы, общая оценка должна считаться неудовлетворительной. Поэтому к способу представления экологической информации с использованием обобщенной функции желательности Харрингтона или любого другого интегрального показателя следует относиться с осторожностью. Чтобы избежать грубых ошибок при принятии административных решений на основе обобщенных показателей необходимо всегда дополнительно указывать на те факторы в представляемых материалах, которые не соответствуют принятым или установленным нормам.

Составлены таблицы, которые дают возможность по результатам последующих измерений произвести оценку современного состояния экосистемы Рыбинского водохранилища по биогенным элементам и органическому веществу.

Отмечается необходимость учета сезонности гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических процессов для более точной оценки качества вод на конкретный момент времени в заданной точке акватории Рыбинского водохранилища.

Авторы считают, что проведенная работа позволит устранить многие недостатки предложенных ранее подходов к оценке состояния экосистем с использованием интегральных характеристик

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 10-05-00593.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гелашвили, Д.Б. и Карандашова, А.А. Принципы экологического нормирования антропогенной нагрузки на лотические экосистемы по показателям макрозообентоса. *Известия Самар. Науч. Центра РАН*, 2002, 2, 4, 252–254.
2. Дмитриев, В.В. и Фрумин, Г.Т., *Экологическое*

- нормирование и устойчивость природных систем, СПб.: Наука, 2004, 295 с.
3. Левич, А.П., Булгаков, Н.Г. и Максимов, В.Н., *Теоретические и методические основы технологии регионального контроля природной среды по данным экологического мониторинга*, М: НИА Природа, 2004, 274.
 4. Максимова, М.П. и Брусиловский, С.А. Система интегральных показателей комплексной оценки функционирования водных экосистем на гидро-биогеохимическом уровне, *Экологические системы и приборы*, 2000, 6, 25-33.
 5. Никаноров, А.М., *Научные основы мониторинга качества вод*, СПб: Гидрометеониздат, 2005, 450-486.
 6. Оксюк О.П., Жукинский В.Н., Брагинский Л.П., Линник Г.Н., Кузьменко М.И. и Кленус В.Г. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши, *Гидробиол. Журнал*, 1993, 29, 4, 62-76.
 7. Никаноров, А.М. и Емельянова, В.П., Систематизация ингредиентов и показателей качества поверхностных вод в оценочных гидрохимических исследованиях. *Материалы научной конференции «Современные проблемы гидрохимии и формирования качества вод»*, Ростов-на-Дону, 2010, 45-49.
 8. Китаев, С.П., *Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов*. Петрозаводск, Карельский научный центр РАН, 2007, 395 с.
 9. Harrington, E.C., The desirability Function. *Industrial Control*, 1965, 21, 10, 494-498.
 10. Адлер, Ю.П., Маркова, Е.В. и Грановский, Ю.В., *Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий*, М.: Наука, 1976, 279.
 11. Алтунин, А.Е. и Семухин, М.В. *Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях*, Тюмень, Изд-во Тюменского гос. ун-та, 2000, 352 с.
 12. Дмитриев, В.В., Определение интегрального показателя состояния природного объекта как сложной системы. 2009. *Среда обитания*, 146-165, www.terrahumana.ru/arhiv/09_04/09_04_16.pdf.
 13. Егоршин, А.А. и Малярец, Л.М., Моделирование интегрального показателя конкурентного статуса предприятия. 2004. *Научн.-техн. сб. «Коммунальное хозяйство городов»*, 50, 54-65.
 14. Магомадов, В.Д., Индикативное планирование инвестиционной деятельности строительной отрасли в регионе. *Автореф. дис. канд. эконом. наук*, М.: 2008, 21 с.
 15. *Рыбинское водохранилище и его жизнь*, Л.: Наука. 1972, 364 с.
 16. Бикбулатов, Э.С., Степанова, И.Э. и Бикбулатова, Е.М., Диагностические таблицы оценки качества вод и выделение экологически опасных районов в Рыбинском водохранилище. *Материалы научной конференции «Современные проблемы гидрохимии и формирования качества вод»*, Ростов-на-Дону, 2010, 191-194.

Harrington's desirability function for natural water quality assessment

E.S. Bikbulatov and I.E. Stepanova

Institute of Inland Water Biology, Russian Academy of sciences, Pos. Borok, Nekouzskii region, Yaroslavl oblast 152742, Russia

The theoretical analysis of the possible application of Harrington's desirability function for the state of natural ecosystems assessment was made. It was shown that the desirability function with double limiting should be used for water quality objects assessment. The function makes it possible to eliminate arbitrary rule while the number of quality classes at different ways of optimization (typification, classification etc.) of information was determined. This resulted in mathematically valid limitation to the maximum 5 types of the first level. It was underlined that if even one particular response or a particular desirability function does not satisfy the requirements, the general estimation should be considered unsatisfactory, in spite of the fact that the other parameters (properties) of the studied system were satisfied. The tables were made which gave the possibility to assess the up-to-date state of the Rybinsk Reservoir ecosystem according to the content of nutrients and organic matters on the basis of future mesurments. The seasonal pattern of hydrophysical, hydrochemical and hydrobiological processes should be taken into account in order to make more accurate the water quality assessment at the concrete time in the definite site in the Rybinsk Reservoir area.

Key words: reservoirs, water quality, ecological standard.

Эрнст Саяфнурович Бикбулатов, к.х.н., ведущий научный сотрудник, лаборатория гидрологии и гидрохимии, Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН (ИБВВ РАН). Область научных интересов: гидрохимия, лимнология, эвтрофикация, качество воды.

Ирина Эрнстовна Степанова, научный сотрудник, лаборатория гидрологии и гидрохимии, Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН (ИБВВ РАН). Область научных интересов: гидрохимия, эвтрофикация, биогенные элементы, качество воды.

Harrington's desirability function for natural water quality assessment

E.S. Bikbulatov and I.E. Stepanova

Abstract: The desirability function method is applied to the assessment of water quality in the Volga basin. The results of the assessment are compared with the results of the fuzzy logic method.

The desirability function method is applied to the assessment of water quality in the Volga basin. The results of the assessment are compared with the results of the fuzzy logic method. The desirability function method is a mathematical model that allows for the assessment of water quality based on a set of criteria. The results of the assessment are compared with the results of the fuzzy logic method. The desirability function method is a mathematical model that allows for the assessment of water quality based on a set of criteria. The results of the assessment are compared with the results of the fuzzy logic method.