

## Оценка состояния водных экосистем с применением нового интегрального индекса возраста

© 2025. И. В. Гермашев<sup>1</sup>, д. т. н., профессор, Е. В. Дербишер<sup>2</sup>, к. т. н., доцент,  
А. И. Новокщёнова<sup>3</sup>, к. с.-х. н., доцент, В. Е. Дербишер<sup>2</sup>, д. х. н., профессор,

<sup>1</sup>Волгоградский государственный университет,  
400062, Россия, г. Волгоград, Университетский пр., д. 100,  
<sup>2</sup>Волгоградский государственный технический университет,  
400131, Россия, г. Волгоград, пр. В.И. Ленина, д. 28,  
<sup>3</sup>Волгоградский государственный аграрный университет,  
400002, Россия, г. Волгоград, Университетский просп., д. 26,  
e-mail: derbisher1@yandex.ru

С помощью интегрального экологического показателя (индекса) водных биоценозов, вычисленного методами нечёткой математики, проанализировано состояние выборочных водоёмов природного парка Волго-Ахтубинской поймы Волгоградской области. В качестве исходных данных были взяты четырёхлетние наблюдения нескольких водоёмов. В результате анализа этих данных предложена нечёткая модель, позволяющая оценивать изменения возраста сукцессии на основании ряда показателей водных растений. Модель опирается на нечёткие числа, которые позволяют учесть неопределённости и неточности уже при проведении вычислений, и для полученных результатов, имея известный уровень неопределённости, проводить их адекватную интерпретацию. Оригинальность метода исследования заключается в определении возрастных характеристик фитоценозов водоёмов в нечётких условиях с применением индекса полного возраста сукцессии. Оценка качества воды служит основой информационного обеспечения мониторинга экологических изменений, происходящих в естественных и искусственных водных биоценозах для принятия мер, снижающих деградацию водоёмов. Предлагаемый интегральный метод определения возрастных стадий сукцессии водных биоценозов совместно с лабораторными и (или) полевыми исследованиями позволяет проводить количественный анализ экологических ситуаций, строить их математические модели, может служить расчётным элементом мониторинга изменения экологического состояния водных объектов. Предлагаемый интегральный подход имеет универсальный характер и может применяться для решения экологических задач, связанных с анализом результатов, выраженных нечёткими числами.

**Ключевые слова:** биоценоз, водоём, возрастная стадия сукцессии, качество воды, мониторинг, нечёткая модель.

## Assessment of the aquatic ecosystem status using the new integral age index

© 2025. I. V. Germashev<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-5507-8508, E. V. Derbisher<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-3707-7189,  
A. I. Novokshchyonova<sup>3</sup> ORCID: 0000-0003-4141-3146, V. E. Derbisher<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-0521-5559

<sup>1</sup>Volgograd state university,  
100, Universitetsky Avenu, Volgograd, Russia, 400062,  
<sup>2</sup>Volgograd state technical university,  
28, V.I. Lenin Avenu, Volgograd, Russia, 400131,  
<sup>3</sup>Volgograd state agricultural university,  
26, Volgograd, Universitetsky Avenue, Russia, 400002,  
e-mail: derbisher1@yandex.ru

Using an integral ecological indicator (index) of aquatic biocenoses calculated using fuzzy mathematics methods, the state of selected reservoirs in the Volga-Akhtuba floodplain Natural Park of the Volgograd region was analyzed. Four-year observations of several reservoirs were taken as initial data. As a result of these data analysis, a fuzzy model was proposed that allows estimating changes in the succession age based on a number of aquatic plants indicators. The model relies on fuzzy numbers, which make it possible to take into account uncertainties and inaccuracies already during calculations; and for the obtained results, having a known level of uncertainty, to carry out their adequate interpretation. The originality of the research method lies in determining the age characteristics of phytocenoses of water bodies in fuzzy

conditions using the index of the full succession age. Water quality assessment serves as the basis for information support for monitoring environmental changes occurring in natural and artificial aquatic biocenoses in order to take measures to reduce the degradation of water bodies. The proposed integral method for determining the age stages of succession of aquatic biocenoses, together with laboratory and (or) field studies, allows for a quantitative analysis of environmental situations, building mathematical models of them. The above method can be a computational element for monitoring changes in the ecological state of water bodies. The proposed integral approach has a universal character and can be used to solve environmental problems related to the analysis of results expressed in fuzzy numbers.

**Keywords:** biocenosis, reservoir, the age stage of succession, water quality, monitoring, fuzzy model.

Разработка и применение объективных показателей оценки состояния сообществ с целью прогнозирования состояния и оптимального управления процессами, позволяющими избежать критических ситуаций – насущная потребность времени. Существует много индексов экологической активности, позволяющих дать вероятностную оценку различных экосистем [1–4]. Отдельно укажем на индексы, связанные с исследованием малых водоёмов, так как именно эта область является предметом данной статьи. Отдельных индивидуальных (дифференциальных) индексов, используемых при изучении экосистем, довольно много [5, 6], например, при оценке индекса обхвата селекции в прудовом рыбоводстве [7], при оценке нормативов цветности воды [8], индекс сапробности [9, 10] и т. д. В зарубежной практике также активно используются экологические индексы оценки водных систем. Можно отдельно указать на работу-аналог [11], в которой описана оценка качества воды в бассейне реки Дунцзян (Китай) с помощью набора индексов оценки водных ресурсов, таких как: индекс биологических диатомовых водорослей – IBD, индекс трофических диатомовых водорослей – TDI, индекс Сладчека – SLA, индекс специфической чувствительности к загрязнению – IPS, общий индекс – IDG, индекс европейского экономического сообщества – COE. Сегодня в мировой практике дифференциальные критерийные подходы [12] к экологическим оценкам сменяются модифицированными гидрохимическими и гидробиологическими оценками состояния водных биоценозов, применяя их как комплексные [13, 14].

В данной работе на примере оценки состояния водоёмов Волго-Ахтубинской поймы Волгоградского региона мы предлагаем новый интегральный индекс, определяющий возрастную стадию сукцессии – ключевой характеристики случайной или поступательной динамики водоёма. Поскольку это имеет решающее значение для настоящей работы, напомним, что под возрастной стадией сукцессии в экологии понимают последовательную закономер-

ную смену одного биоценоза (в нашем случае водного) другим, на определённом участке среды во времени, в результате направленного изменения абиотического окружения [15]. Представляется, что выбор характеристики возрастной стадии сукцессии, когда произошли изменения исследуемого биоценоза, в том числе водного, является актуальным и надёжным способом отражения её временных и структурных изменений. Для обработки экспериментальных данных используем аппарат нечёткой математики [16–18].

### Объекты и методы исследования

Рассмотрим предлагаемую стратегию на примере интегральной оценки динамики изменения состояния ряда озёр Волго-Ахтубинской поймы (на территории Волгоградской области). Живописная и богатая флорой и фауной Волго-Ахтубинская пойма начала стремительно вымирать и экологов всерьёз пугает будущее поймы. Выбор объектов исследования был не случайным, поскольку на рассматриваемой территории наблюдается прямая связь озёр с деятельностью природной системы в целом. Выбранные для исследования озёра и их водосбор представляют единый, многокомпонентный природный динамический объект.

Практическая часть исследований проводилась стандартными методами [19–21] в летний период 2015–2018 гг. на озёрах: Васино, Давыдкино, Кувшинковое, Кудаевское, Клеши, Раскатное. Укажем, что расчётные данные получены в нашем случае на основе оценки численности продуцентов (водных растений, произрастающих в исследуемых озёрах), как одного из показателей, характеризующих возрастную стадию сукцессии водоёма ( $Q_j$ ). Полученные данные приведены в таблице 1. Выделим четыре качественные сериальные сукцессионные стадии развития каждого водоёма, включающие 4 серии на пути к современному его стабильному состоянию, рассматривая в совокупности динамику всех компонентов водного биоценоза. Построим интервальную

шкалу, в которой измеряется полная возрастная стадия сукцессии водоёма. Выделяем три функциональные группы водного сообщества: продуценты (низшие и высшие водные растения), консументы 1 порядка (простейшие, низшие ракообразные, личинки насекомых, черви, моллюски, растительноядные рыбы), консументы 2, 3 порядка (рыбы, водные позвоночные). По каждой функциональной группе выбираем набор параметров, характерных для выбранных водоёмов и измеряем показатели, доступные для исследования. Предварительно формализуем задачу в математических терминах, пригодных для использования методов нечёткой математики, опирающейся на алгебры нечётких чисел, преимущество которых состоит, во-первых, в том, что функция принадлежности нечёткого числа позволяет описать изменения неопределённости, характерные для данного значения, и использовать эту информацию для более адекватной интерпретации полученных результатов. Во-вторых, в возможности численно оценить абсолютное качество состояния и путём систематизации и соответствующей обработки информации сравнивать между собой объекты с неодинаковым набором свойств, описывающих систему, что особенно важно при принятии решений в условиях многофакторности, разнообразности, разнотипности данных и других видов неопределённости. Следует обратить внимание и на то, что многие параметры озёрных систем и процессов, происходящих в них, невозможно задать чёткими числовыми значениями, что вообще свойственно природной среде. Поэтому возникает необходимость в поисках концептуального подхода, обеспечивающего поддержку принятия решений в условиях дефицита информации.

Пусть для водоёма определено  $m$  показателей  $Q_1, \dots, Q_m$ , по которым производится вычисление возраста его сукцессии числом индексов оценки популяций. В данной работе для конкретизации метода рассмотрена подсистема водных растений. Экспертный анализ данных (табл. 1) показал, что некоторые из них изменяются случайно в зависимости от возраста водоёма. Сформирована подборка из чётких и нечётких данных, итоговая фактология представлена в таблице 1.

### Результаты и обсуждение

Расчёт дифференциального индекса возраста озера осуществлялся в нечётких числах. Они в данном случае обозначены через  $I_A$  – не-

чёткий индекс возраста сукцессии водоёма, где  $I_A: [0;1] [0;1]$ . На шкале заданы значения  $I_A$ :  $a_y$  – нечёткое число, соответствующее первой серии сукцессии,  $a_m$  – второй,  $a_g$  – третьей,  $a_o$  – четвёртой,  $a_c$  – конкретному оцениваемому водоёму. Такой подход позволяет идентифицировать водоём по параметрам выбранной шкалы (на рисунке 1 это климаксовый (зрелый, устойчивый) водоём) и получить числовую, то есть количественную оценку. Чтобы найти значения  $a_u(x)$ , где  $u \in \{y, m, g, o, c\}$ , определены области значений  $Q_j$ , типичных для каждого из серий сукцессии водоёма:  $Q_{yj}, Q_{mj}, Q_{gj}, Q_{oj}, Q_{cj}$ , – первой, второй, третьей, четвёртой (которым условно присвоим категории соответственно молодой, зрелый, стареющий, старый водоём) и оцениваемого соответственно и проведено их математическое нормирование таким образом, чтобы перевести области значений каждого из параметров в отрезок  $[0; 1]$ ,  $j = 1, \dots, m$ .

Критерии  $Q_{uj}$  переведены в нечёткие числа  $q_{uj}$  на универсуме  $[0; 1]$  [14]:

$$\left. \begin{aligned} & q_{uj}(x) = e^{-\frac{(x-c_{uj})^2}{\sigma_{uj}^2}} x \in [0; 1]; u \in \{y, m, g, o, c\}; \\ & \sigma_{uj} = \frac{d_{uj}}{2\sqrt{\ln 2}}, \\ & u \in \{y, m, g, o\}; c_{yj} = \frac{d_{yj}}{2}, c_{mj} = \frac{2d_{yj} + d_{mj}}{2}, \\ & c_{gj} = \frac{2d_{yj} + 2d_{mj} + d_{gj}}{2}, \\ & c_{oj} = \frac{2d_{yj} + 2d_{mj} + 2d_{gj} + d_{oj}}{2}, \\ & \sigma_{cj} = \frac{d_{c2j} - d_{c1j}}{2\sqrt{\ln 2}}, \\ & \sigma_{cj} = \frac{d_{c2j} - d_{c1j}}{2\sqrt{\ln 2}}, \\ & c_{cj} = \frac{d_{c2j} + d_{c1j}}{2}, \\ & d_{c1j} = \frac{|Q'_{0cj}|}{|Q'_j|}, \end{aligned} \right\} (1)$$

где  $Q'_{0cj}$  – область значений параметра, меньших, чем в  $Q'_{cj}$ , т. е.  $\forall x' \in Q'_{0cj}, x'' \in Q'_{cj}: x' < x''$ . Следует также отметить, что для нормирования  $Q_{0cj}$  и  $Q_{cj}$  использованы те же процедуры, что и для  $Q_j$ , в результате чего получены  $Q'_{0cj}$  и  $Q'_{cj}$ .

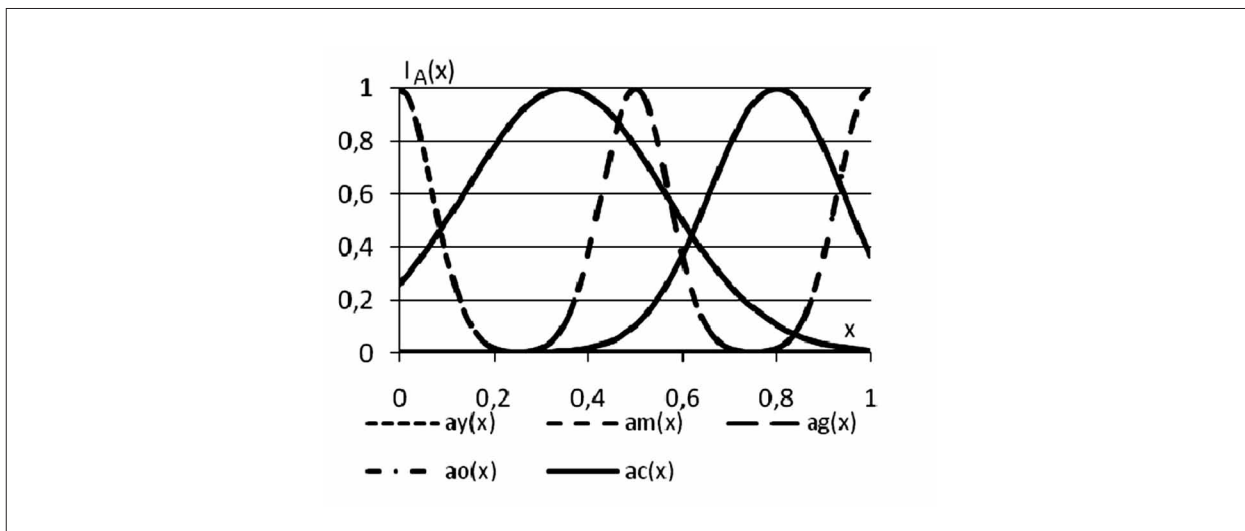


Рис. 1. Нечёткие значения индекса  $I_A$  для абстрактного водоёма  
 Fig. 1. Fuzzy values of the  $I_A$  index for abstract water body

Поясним последовательность использования формул (1), реализующих математическую модель в вычислениях (рис. 1).

Группа формул (1) преодолевает следующие обычные методические сложности изначальной экологической задачи:

1) Масштабирование – приведение параметров к интервалу значений  $[0; 1]$ .

2) Относительность данных. Перевод абсолютных значений в относительные:  $d_{uj}$  показывает долю значений  $j$ -того параметра, соответствующих классу  $u$ , от суммарной по всем классам ( $y, m, g$  и  $o$ ).

3) Безразмерность. Лишение размерности параметров играет ключевую роль в многокритериальном анализе рассматриваемой задачи, поскольку позволяет, используя функциональные группы водного биоценоза, вычислять интегральные показатели системы в целом.

4) Упорядочивание. Шкала  $I_A$  построена таким образом, что разбиение отрезка  $[0; 1]$  осуществляется на четыре области, расположенные в порядке, соответствующем возрастному классу водоёма:  $y, m, g, o$ .

В свою очередь формулы (1) нормируют функции принадлежности так, чтобы величина  $q_{uj}(x)$  была больше или равнялась 0,5 для всех значений  $x$ , соответствующих значениям  $Q_{uj}$ . При этом сами вычисления приводят к получению матрицы значений  $a_{uj}$ ,  $u \in \{y, m, g, o, c\}$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$ , которые показывают возрастную стадию сукцессии любого водного биоценоза по  $j$ -тому параметру, т. е. возраст для системы  $u$ , который отражает нечёткий вектор  $\bar{a}_u = (q_{u1}, \dots, q_{um})$ . Для свёртки вектора

$\bar{a}_u$  в нечёткое число  $a_u$  использован известный во многих областях принцип взвешенного голосования [14], заключающийся в следующей формуле:

$$a_u = \sum_{j=1}^m \alpha_j q_{uj}, \quad (2)$$

где  $u \in \{y, m, g, o\}$ ,  $\alpha_j \in \mathbb{R}^+$  – уровень значимости  $j$ -того параметра,  $\sum_{j=1}^m \alpha_j = 1$ .

Здесь также возникает некая проблема, которая состоит в том, что для отдельного параметра возрастные границы будут свои, и одинаковые значения  $I_A$  на самом деле будут отражать разные возрастные стадии сукцессии. Чтобы преодолеть проблему, мы провели голосование по величинам, показывающим, насколько отличается  $a_{cj}$  от граничных величин  $a_{uj}$ ,  $u \in \{y, m, g, o\}$ :

$$a_c = \frac{1}{4} \sum_{u \in \{y, m, g, o\}} \left( a_u + \sum_{j=1}^{m_c} \alpha_{cj} (q_{cj} - q_{uj}) \right), \quad (3)$$

$$\alpha_{cj} = \frac{\alpha_j}{\sum_{k \in J_c} \alpha_k}, \quad (4)$$

где  $m_c$  – количество параметров для оцениваемого водоёма,  $\alpha_{cj} \in \mathbb{R}$  – уровень значимости  $j$ -того параметра оценки водоёма,  $J_c$  – множество индексов параметров оценки водоёма,  $m_c = |J_c|$ .

Для расчёта индекса  $I_A$  возрастной стадии сукцессии, приведшей водоём к его настоящему стабильному состоянию, с помощью приведённой выше расчётной методики и математической модели, использовали данные,

Таблица 1 / Table 1

Экспериментальные данные, полученные по шести водоёмам Волго-Ахтубинской поймы  
The experimental data obtained on six water bodies of the Volga-Akhtuba floodplain

Видовые названия продуцентов (Q <sub>i</sub> ) / Species names of producers (Q <sub>i</sub> )	Название водоёма / Name of a water body					
	Давыдкино / Davidkino	Кудаевское / Kudaevskoe	Клешни / Kleshni	Кувшинковое / Kuvshinkovoe	Раскатное / Raskatnoe	Васино / Vasino
<i>Ceratophyllum demersum</i>	3,5	2,7	3,4	4,8	1,8	0
<i>Vallisneria spiralis</i>	1	2	0	0,6	0	0
<i>Najas major</i>	1,5	0,6	0	1,1	0,4	0
<i>Myriophyllum spicatum</i>	0	0,1	0	0,3	–	0
<i>Potamogeton perfoliatus</i>	0,6	1	1,5	0,4	0,6	0
<i>Potamogeton pectinatus</i>	0	0	0,7	0,1	0,1	0
<i>Potamogeton lucens</i>	0	0,3	0,5	0,8	0	5
<i>Potamogeton pusillus</i>	0,4	0	0	–	0,1	0
<i>Nymphoides peltata</i>	0	0	0	–	0,7	0,5
<i>Polygonum amphibium</i>	0	0	0	–	0	0
Показатели, характеризующие возрастную стадию сукцессии водоёма (для водных растений) Indicators characterizing the age stage of the water body succession (for aquatic plants)						
Число видов погружённых и плавающих макрофитов / Number of submerged and floating makrophyte species	11	7	9	13	12	7
Число видов макрофитов с плавающими листьями (нейстофитов) / Number of macrophyte species with floating leaves (neustophytes)	3	0	3	3	2	4
Покрытие водного зеркала нейстофитами, % / Water surface covering with neustophytes, %	<1	0	<1	1	15	2
Число видов рдестов / Number of rdest species	3	2	4	4	3	1
Число видов харовых водорослей / Number of char algae species	1	0	1	1	3	0
Покрытие водного зеркала харовыми водорослями, % / Water surface covering with char algae, %	<1	0	<1	5	<1	0

Примечание: прочерк в таблице указывает на отсутствие экспериментальных данных для конкретного вида продуцентов.

Note: a dash in the table indicates no experimental data for a specific producer species.

представленные в таблице 1. Обработанные результаты приведены в таблице 2. Воспользовавшись процедурой взвешенного голосования (2)-(3) вычислены значения интегрального индекса I<sub>A</sub> (графическая иллюстрация дана на рисунке 2).

В результате исследования озёра Волго-Ахтубинской поймы можно расположить по увеличению возраста сукцессии в следующий ряд: Кудаевское, Давыдкино, Кувшинковое, Раскатное, Клешни, Васино; все озёра принадлежат ко второй возрастной стадии сукцессии;

озеро Клешня старше водоёма Кудаевского на величину  $e^{-\frac{(x-0,0931)^2}{0,7115^2}}$ .

В качестве значения действительного индекса возраста I<sub>A</sub><sup>R</sup> мы использовали аргумент максимального значения функции:

$$I_A^R = \arg \max_{[0;1]} I_A(x), \tag{5}$$

и получили действительные значения a<sub>c</sub><sup>R</sup>, представленные в таблице 3. Индексы возраста a<sub>c</sub> оцениваемых водоёмов даны на рисунке 2.

Таблица 2 / Table 2

Оценка выборочных водоёмов Волго-Ахтубинской поймы  
Assessment of selective water bodies in the Volga-Akhtuba floodplain

Видовые названия продуцентов (водных растений), одного из показателей, характеризующих возрастную стадию сукцессии водоёма ( $Q_j$ ) / Species names of producers (aquatic plants), one of the indicators characterizing age of succession of a water body ( $Q_j$ )	Уровень значимости $\alpha_j$ Significance value $\alpha_j$	Серийная стадия сукцессии водоёма / Serial stage of water body succession			
		I	II	III	IV
<i>Ceratophyllum demersum</i>	0,0303	0-1	0-2	0-3	0-5
<i>Vallisneria spiralis</i>	0,05051	0-3	0-1	0	0
<i>Najas major</i>	0,0303	0-2	0-3	0-2	0-1
<i>Myriophyllum spicatum</i>	0,05051	0-1	0-1	0	0
<i>Potamogeton perfoliatus</i>	0,0303	0-1	0-3	0-2	0
<i>Potamogeton pectinatus</i>	0,0303	0-1	0-3	0-2	0
<i>Potamogeton lucens</i>	0,0404	0-1	0-1	1-3	3-5
<i>Potamogeton pusillus</i>	0,0303	0-1	0-1	0-2	0
<i>Nymphoides peltata</i>	0,05051	0	0	0-2	0-5
<i>Polygonum amphibium</i>	0,05051	0	0	0-1	0-2
Число видов погружённых и плавающих макрофитов Number of submerged and floating makrophyte species	0,05051	3-6	5-8	10-17	1-5
Число видов макрофитов с плавающими листьями (нейстофитов) / Number of macrophyte species with floating leaves (neustophytes)	0,0404	0	1-2	2-3	1-5
Покрытие водного зеркала нейстофитами, % Water surface covering with neustophytes, %	0,0303	0	0-5	0-10	0-50
Число видов рдестов / Number of rdest species	0,05051	0-2	1-3	3-7	0-2
Число видов харовых водорослей Number of char algae species	0,05051	0	0-1	0-5	0
Покрытие водного зеркала харовыми водорослями, % Water surface covering with char algae, %	0,05051	0	<1	0-50	0

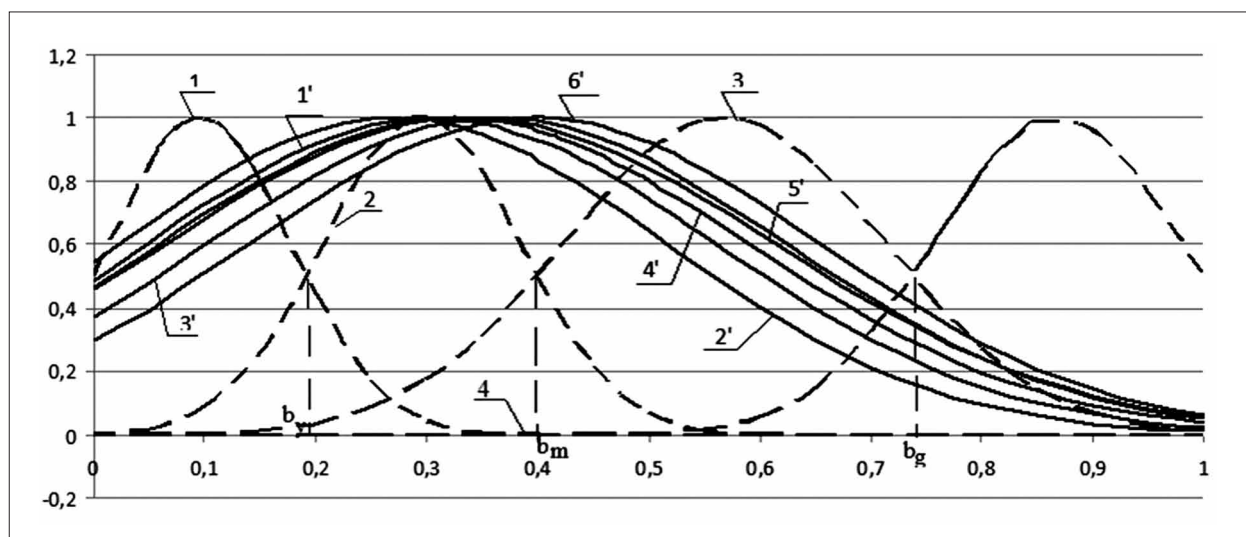


Рис. 2 Графическая иллюстрация результатов вычисления индекса  $I_A(x)$   
1 – молодой, 2 – зрелый, 3 – стареющий, 4 – старый; 1' – Давыдкино, 2' – Кудавское, 3' – Клешни, 4' – Кувшинковое, 5' – Раскатное, 6' – Васино  
Fig. 2 Graphic illustration of  $I_A(x)$  index calculation results  
1 – young, 2 – mature, 3 – senile, 4 – old; 1' – Davidkino, 2' – Kudaevskoe, 3' – Kleshni, 4' – Kuvshinkovoe, 5' – Raskatnoe, 6' – Vasino

Таблица 3 / Table 3

Результаты количественной классификации возраста водоёмов Волго-Ахтубинской поймы  
Results of quantitative age classification of water bodies in the Volga-Akhtuba floodplain

Название водоёма Name of water body	Действительный индекс возраста $a_c^R$ Valid index of age $a_c^R$
Молодые водоёмы (I сериальная стадия) / Young water body (serial stage I)	
Не выявлено / Not revealed	
Зрелые водоёмы (II сериальная стадия), $b_y=0,1921$ Mature water body (serial stage II), $b_y=0.1921$	
Кудаевское / Kudaevskoe	0,2702
Давыдкино / Davidkino	0,3043
Кувшинковое / Kuvsinkovoe	0,3249
Раскатное / Raskatnoe	0,3391
Клешни / Kleshni	0,3633
Васино / Vasino	0,3976
Стареющие водоёмы (III сериальная стадия), $b_m=0,3999$ Senile water body (serial stage III), $b_m=0.3999$	
Не выявлено / Not revealed	
Старые водоёмы (IV сериальная стадия), $b_g=0,7375$ Old water body (serial stage IV), $b_g=0.7375$	
Не выявлено / Not revealed	

Далее вычислены граничные значения  $b_u$  ( $u \in \{y, m, g\}$ ) для классов:  $b_y$  – между молодыми и зрелыми,  $b_m$  – между зрелыми и стареющими,  $b_g$  – между стареющими и старыми, – как точки пересечения соответствующих функций принадлежности, т. е. удовлетворяющих следующим равенствам (табл. 3):  $a_y(b_y)=a_m(b_y)$ ,  $a_m(b_m)=a_g(b_m)$ ,  $a_g(b_g)=a_o(b_g)$ . Окончательную возрастную классификацию водоёмов проводили по значениям  $I_A^R$ . При этом считаем водоём молодым, если  $a_c^R < b_y$ , зрелым, если  $b_y \leq a_c^R < b_m$ , стареющим, если  $b_m \leq a_c^R < b_g$ , старым, если  $b_g \leq a_c^R$ . Итоговые результаты классификации в количественных интегральных оценках представлены в таблице 3.

### Заключение

Предлагаемый интегральный метод определения возрастных стадий сукцессии водных биоценозов может служить расчётным элементом мониторинга изменения экологического состояния водных объектов. Предложенный индекс носит универсальный характер и может быть использован для оценки разнообразных биоценозов, оцениваемых по многим параметрам, путём определения типичных значений каждой системы в заданном ареале с последующей математической обработкой экспериментальных данных.

Предлагаемая методика расчёта совместно с лабораторными и (или) полевыми исследованиями позволяет проводить количественный анализ экологических ситуаций, строить их математические модели, которые, по сути и природе объектов, являются нечёткими и поэтому требуют применения методов нечёткой математики, как это показано в настоящей статье.

*Работа выполнена в рамках реализации проекта 12фцп-Н5-06 «Разработка показателей и критериев оценки состояния водных и околоводных экосистем и возможных норм допустимой нагрузки на водный режим по экологическим показателям» Федеральной целевой программы «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012–2020 годах», а в части разработки и применения математических моделей и методов, в частности нечёткой математики, моделирования и идентификации сложных систем, поддержана совместным грантом РФФИ и правительства Волгоградской области (грант № 18-48-340011).*

### Литература

1. Тикунов В.С., Белоусов С.К. Интегральная характеристика качества атмосферного воздуха городов Европы // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 1. С. 47–55. doi: 10.25750/1995-4301-2023-1-047-055

2. Лукин С.В. Динамика агроэкологического состояния почв Белгородской области при длительном сельскохозяйственном использовании // Почвоведение. 2023. № 12. С. 1671–1685. doi: 10.31857/S0032180X23600890
3. Кутявина Т.И., Рутман В.В., Ашихмина Т.Я. Определение трофического статуса водоёма и пространственного распределения водной растительности по интегральным показателям // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 1. С. 42–46. doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-042-046
4. Дербишер Е.В., Погорелов П.И., Гермашев И.В., Дербишер В.Е. Априорное ранжирование факторов при расчёте индекса экологической опасности веществ с использованием нечётких множеств // Химическая промышленность сегодня. 2006. № 8. С. 48–56.
5. Гермашев И.В., Дербишер В.Е., Дербишер Е.В., Маркушевская Е.А. Анализ нечётких данных для оптимизации химико-технологических систем // Информационные технологии. 2018. Т. 24. № 3. С. 153–160.
6. Гермашев И.В., Дербишер Е.В., Дербишер В.Е. Вычисление арифметических операций над нечёткими числами для анализа сложных систем // Математические методы в технике и технологиях. 2016. № 2(84). С. 63–65.
7. Хабжоков А.Б., Казанчев С.Ч., Исмаилов А.А. Экологическое значение индекса обхвата в селекции карпа // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2018. № 2 (160). С. 124–129.
8. Ялалетдинова А.В., Малкова М.А., Еникеева Л.В., Кантор Е.А. О возможности использования эмпирической функции распределения для количественной оценки вероятности превышения нормативов по цветности // Теоретическая и прикладная экология. 2024. № 4. С. 73–82. doi: 10.25750/1995-4301-2024-4-073-082
9. Масюткина Е.А. Оценка экологического состояния оз. Виштынецкого с применением различных гидробиологических индексов // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: естественные и медицинские науки. 2014. № 7. С. 66–76.
10. Гриб Й.В., Шандрук О.М. Використання екологічних індексів та просторових біомаркерів у ставковому рибництві // Рибогосподарська наука України. 2009. № 3 (9). С. 78–84.
11. Deng P., Lei Y., Liu W., Wang X. Exploration of benthic diatom indices to evaluate water quality in rivers in the Dongjiang basin // Acta Ecologica Sinica. 2012. V. 32. No. 16. P. 5014–5024. doi: 10.5846/stxb201112071867
12. Pasquaud S., Courrat A., Fonseca V.F., Gamito R., Gonçalves C.I., Lobry J., Lepage M., Costa M.J., Cabral H. Strength and time lag of relationships between human pressures and fish-based metrics used to assess ecological quality of estuarine systems // Estuar. Coast. Shelf Sci. 2013. V. 134. P. 119–127.
13. Домбровский К.О., Крупей К.С. Экологическая оценка малых рек г. Запорожья с помощью интегрального индекса экологического состояния // Вестник Международной академии наук (Русская секция). 2011. № 2. С. 220.
14. Rylsky O.F., Dombrovskiy K., Masikeyvych Yu., Masikeyvych A., Malovanyu M. Evaluation of water quality of the Siret river by zooperiphyton organisms // Journal of Ecological Engineering. 2023. V. 24. No. 6. P. 294–302. doi: 10.12911/22998993/163166
15. Абдюкова Э.А., Кулагин Г.С., Рашитова Г.М., Абдюкова А.Ю. Экологическая оценка воздействия агропромышленного комплекса на состояние малых рек Башкортостана // Научный журнал КубГАУ. 2011. № 73 (09). С. 24–35.
16. Гермашев И.В., Дербишер В.Е., Лосев А.Г. Анализ и идентификация сложных систем в естественных науках. Волгоград: Изд-во ВолГУ, 2018. 272 с.
17. Хоружая Т.А. Оценка экологической опасности. М.: Книжный сервис, 2002. 208 с.
18. Гермашев И.В., Дербишер Е.В., Дербишер В.Е., Карташова А.В., Титов А.В. Алгебра нечётких чисел с унимодальной функцией принадлежности // Вестник СПбГУ. Математика. Механика. Астрономия. 2022. Т. 9. № 4. С. 590–601. doi: 10.21638/spbu01.2022.402
19. Методика экологической оценки качества поверхностных вод по соответствующим категориям // Сборник нормативно-методических документов по организации и осуществлению мониторинга поверхностных вод. Харьков: ИД «ИНЖЕК», 2007. 38 с.
20. Правила охраны поверхностных вод (типовые положения). М.: Госкомприроды СССР, 1991. 34 с.
21. Никаноров А.М., Хоружая Т.А., Бражникова Л.В., Жулидов А.В. Мониторинг качества вод: оценка токсичности. СПб.: Гидрометеиздат, 2000. 159 с.

## References

1. Tikunov V.S., Belousov S.K. Integral characteristic of air quality of European cities // Theoretical and Applied Ecology. 2023. No. 1. P. 47–55 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-1-047-055
2. Lukin S.V. Dynamics of the agroecological state of the soils of the central chernozem region during long-term agricultural use (on the example of the Belgorod Region) // Pochvovedenie. 2023. No. 12. P. 1671–1685 (in Russian). doi: 10.31857/S0032180X23600890
3. Kutjavina T.I., Rutman V.V., Ashikhmina T.Ya. Determination of the trophic status of the water reservoir and spatial distribution of aquatic vegetation by integral indicators // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 1. P. 42–46 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-042-046
4. Derbisher E.V., Pogorelov P.I., Germashev I.V., Derbisher V.E. A priori ranking of factors in calculating the environmental hazard index of substances using fuzzy sets // Chemical Industry Developments. 2006. No. 8. P. 48–56 (in Russian).
5. Germashev I.V., Derbisher V.E., Derbisher E.V., Markushevskaya E.A. The fuzzy data analysis for the chem-



- ical-technological systems optimization // Information technologies. 2018. V. 24. No. 3. P. 153–160 (in Russian).
6. Germashev I.V., Derbisher E.V., Derbisher V.E. Calculating arithmetic operations on fuzzy numbers for analyzing complex systems // *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh*. 2016. No. 2 (84). P. 63–65 (in Russian).
7. Khabzhokov A.B., Kazanchev S.Ch., Ismailov A.A. Ecological significance of body girth index in carp breeding // *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2018. No. 2 (160). P. 124–129 (in Russian).
8. Yalaletdinova A.V., Malkova M.A., Enikeeva L.V., Kantor E.A. On the possibility of using an empirical distribution function to quantify the probability of exceeding the water color standards // *Theoretical and Applied Ecology*. 2024. No. 4. P. 73–82 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2024-4-073-082
9. Masyutkina E.A. An assessment of the ecological condition of Lake Vištytis using various hydrobiological indices // *IKBFU's Vestnik. Series: Natural and Medical Sciences*. 2014. No. 7. P. 66–76 (in Russian).
10. Grib I.V., Shandruck O.M. The use of ecological indexes and spatial biomarkers in pond fish-farming // *Ribogospodarska nauka Ukraïni*. 2009. No. 3 (9). P. 78–84 (in Ukrainian).
11. Deng P., Lei Y., Liu W., Wang X. Exploration of benthic diatom indices to evaluate water quality in rivers in the Dongjiang basin // *Acta Ecologica Sinica*. 2012. V. 32. No. 16. P. 5014–5024 (in Chinese). doi: 10.5846/stbx201112071867
12. Pasquaud S., Courrat A., Fonseca V.F., Gamito R., Gonçalves C.I., Lobry J., Lepage M., Costa M.J., Cabral H. Strength and time lag of relationships between human pressures and fish-based metrics used to assess ecological quality of estuarine systems // *Estuar. Coast. Shelf Sci*. 2013. V. 134. P. 119–127. doi: 10.1016/j.ecss.2013/02/002
13. Dombrovsky K.O., Krupey K.S. Ecological assessment of Zaporozhye small rivers by integral index of ecological condition // *Herald of the International Academy of Science. Russian Section*. 2011. No. 2. P. 220 (in Russian).
14. Rytsky O., Dombrovskiy K., Masikevych Yu., Masikevych A., Malovanny M. Evaluation of water quality of the Siret river by zooperiphyton organisms // *Journal of Ecological Engineering*. 2023. V. 24. No. 6. P. 294–302. doi: 10.12911/22998993/163166
15. Abdyukova E.A., Kulagin G.S., Rashitova G.M., Abdyukova A.Yu. Ecological estimation of agricultural complex influence on the condition of small rivers of Bashkortostan // *Scientific journal of KubSAU*. 2011. No. 73 (09). P. 24–35 (in Russian).
16. Germashev I.V., Derbisher V.E., Losev A.G. Analysis and identification of complex systems in the natural sciences. Volgograd: Publishing House of Volgograd State University, 2018. 272 p. (in Russian).
17. Khoruzhaya T.A. Environmental hazard assessment. Moskva: Knizhnyy servis, 2002. 208 p. (in Russian).
18. Germashev I.V., Derbisher E.V., Derbisher V.E., Kartashova A.V., Titov A.V. Algebra of fuzzy numbers with unimodal membership function // *Vestnik of Saint Petersburg University. Mathematics. Mechanics. Astronomy*. 2022. V. 9. No. 4. P. 590–601 (in Russian). doi: 10.21638/spbu01.2022.402
19. Methodology of environmental assessment of surface water quality in the relevant categories // *Collection of normative and methodological documents on the organization and implementation of surface water monitoring*. Kharkiv: ID “INZhEK”, 2007. 38 p. (in Russian).
20. Rules for the protection of surface waters (standard provisions). Moskva: Goskompirody SSSR, 1991. 34 p. (in Russian).
21. Nikanorov A.M., Khoruzhaya T.A., Brazhnikova L.V., Zhulidov A.V. Monitoring of water quality: assessment of toxicity. Sankt-Peterburg: Hydrometeoizdat, 2000. 159 p. (in Russian).