

ЭКОЛОГИЯ / ECOLOGY

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.47>

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ОБОБЩЕННОЙ ШКАЛЫ
ЭКОЛОГИЧЕСКИХ МОДИФИКАЦИЙ

Научная статья

Кондратьева Т.А.^{1,*}, Никоненкова Т.², Степанова Н.³

¹ORCID : 0000-0002-8800-9098;

²ORCID : 0000-0002-8871-2162;

³ORCID : 0000-0003-1733-9062;

¹ Управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Республики Татарстан, Казань, Российская Федерация

^{2,3} Казанский федеральный университет, Казань, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (tatjana_kondrate[at]mail.ru)

Аннотация

Водные экосистемы реагируют на антропогенное воздействие как единое целое приспособительными изменениями – экологическими модификациями. Выделяется несколько стадий изменения инвариантного состояния экосистем: экологический прогресс, экологический регресс, экологическая модуляция. Для определения уровня инвариантного состояния, на основе проведенного статистического анализа и моделирования отнесения качества воды по биологическим показателям к соответствующему классу, выделены интервалы содержания наиболее значимых гидрохимических предикторов. Разработана рабочая шкала для оценки инвариантного состояния водных экосистем по гидрохимическим и гидробиологическим параметрам. Получена статистическая модель, связывающая изменения в химическом составе воды и изменения качественных и количественных характеристик гидробионтов как реакции экосистемы на изменение внешней среды.

Ключевые слова: водные экосистемы, экологические модификации, инвариантное состояние, экологический регресс, антропогенное напряжение.

THE USE OF MATHEMATICAL METHODS TO DEVELOP A GENERALISED SCALE OF ENVIRONMENTAL
MODIFICATIONS

Research article

Kondrateva T.A.^{1,*}, Nikonenkova T.², Stepanova N.³

¹ORCID : 0000-0002-8800-9098;

²ORCID : 0000-0002-8871-2162;

³ORCID : 0000-0003-1733-9062;

¹ Department for Hydrometeorology and Environmental Monitoring of the Republic of Tatarstan, Kazan, Russian Federation

^{2,3} Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation

* Corresponding author (tatjana_kondrate[at]mail.ru)

Abstract

Water ecosystems respond to anthropogenic impact as a whole by adaptive changes – ecological modifications. There are several stages of changes in the invariant state of ecosystems: ecological progress, ecological regression, ecological modulation. To determine the level of invariant state, based on the statistical analysis and modelling of water quality by biological indicators to the appropriate class, intervals of the most significant hydrochemical predictors were determined. A working scale for evaluating the invariant state of water ecosystems by hydrochemical and hydrobiological parameters has been developed. A statistical model linking changes in the chemical composition of water and changes in the qualitative and quantitative characteristics of hydrobionts as an ecosystem response to changes in the external environment has been obtained.

Keywords: water ecosystems, ecological modifications, invariant state, ecological regression, anthropogenic stress.

Введение

Одной из современных экспертных оценок в системе мониторинга поверхностных вод считается методика экологических модификаций [1]. Согласно этой методике, разработанной Абакумовым В.А. [2], биоценоз реагирует на испытываемое им антропогенное воздействие как единое целое приспособительными изменениями – экологическими модификациями. Выделяется несколько стадий изменения экосистем под действием различных возмущающих факторов, прежде всего, загрязнений: экологический прогресс, экологическая модуляция, экологический регресс. На основе теории экологических модификаций были разработаны методы для оценки инвариантного состояния водных экосистем [3], [4], [5]. Данные методы в настоящее время используются в системе мониторинга на территории Российской Федерации.

Однако данные методы разработаны без учета региональных особенностей водных объектов и не включают гидрохимические параметры, изменение которых приводит к переходу системы из одного инвариантного состояния в другое.

Цель данной работы – разработка комплексной рабочей шкалы для оценки инвариантного состояния водных экосистем по гидрохимическим и гидробиологическим показателям, а также построение статистической модели,

связывающей изменения в химическом составе с изменением качественных и количественных характеристик гидробионтов.

Методы и принципы исследования

В качестве исходного материала были использованы многолетние ряды данных (2008-2018 гг.) по гидрохимическим и гидробиологическим показателям, полученные в результате мониторинга водных объектов Республики Татарстан. Мониторинг проводился на Куйбышевском водохранилище и его притоках (рр. Вятка, Казанка, Степной Зай, Меша, Свяга, Илеть, Юшут). В анализ были включены 21 гидрохимический компонент и 12 гидробиологических (число видов, численность, биомасса фитопланктона, инфузорий, зоопланктона, зообентоса), объединенных в одну общую базу данных.

Для статистической обработки полученных данных использовали методы кластерного анализа, иерархического кластерного анализа и ординационных методов [6].

Для построения модели в пакете R использовали функцию `multinom()` из пакета `pnet`, которая осуществляет оценку коэффициентов системы логит-моделей с использованием алгоритмов построения искусственных нейронных сетей.

Статистический анализ был выполнен с использованием программного обеспечения R [7].

Основные результаты

В ходе проведенного однофакторного дисперсионного анализа были выделены 4 гидрохимических ингредиента, которые оказались наиболее показательными в оценке, как качества воды исследованных водных объектов, так и инвариантного состояния водных сообществ (фоновое, антропогенное напряжение, элементы экологического регресса, экологический и метаболический регресс). К ним относятся содержание органических веществ по ХПК и БПК₅, аммонийного азота и меди. Данные показатели вносят основной вклад в загрязнение поверхностных вод Куйбышевского водохранилища, загрязненность воды для которых определяется как «характерная».

С использованием метода однофакторного дисперсионного анализа с 95% вероятностью были выделены интервалы для расчета медиан главных гидрохимических показателей, влияющих на показатели гидробиоценозов исследованных водных объектов. К таким показателям относятся содержание органических веществ по ХПК и БПК₅, ионы аммония и соединения меди. На рис. 1 представлены медианные значения вышеуказанных показателей, соответствующих инвариантному состоянию экосистемы по показателям фитопланктона.

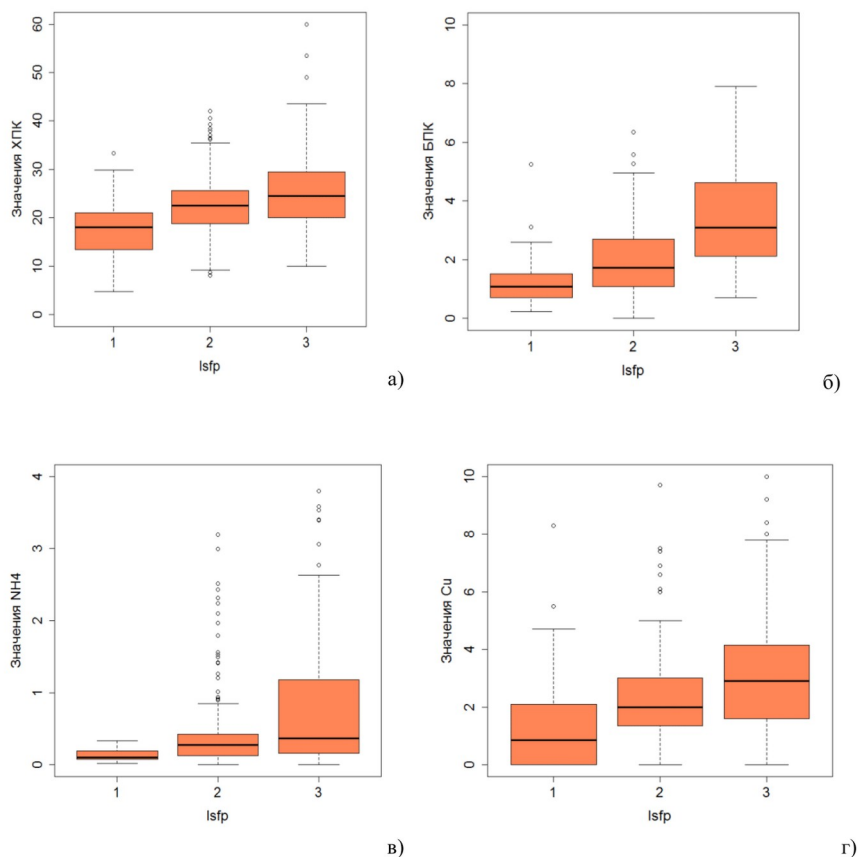


Рисунок 1 - Интервалы содержания органических веществ по ХПК (а), БПК₅ (б), азота аммонийного (в), меди (г) в зависимости от инвариантного состояния экосистемы по показателям фитопланктона

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.47.1>

Примечание: по оси абсцисс цифрами обозначены уровни инвариантного состояния: 1 – фон, 2 – антропогенное напряжение 3 – элементы экологического регресса+экологический регресс

Зоопланктон, в отличие от фитопланктона, более остро реагирует на переход экосистемы из состояния экологического регресса в метаболический регресс. На рис. 2 представлены медианные значения гидрохимических показателей, соответствующих инвариантному состоянию экосистемы по показателям зоопланктона.

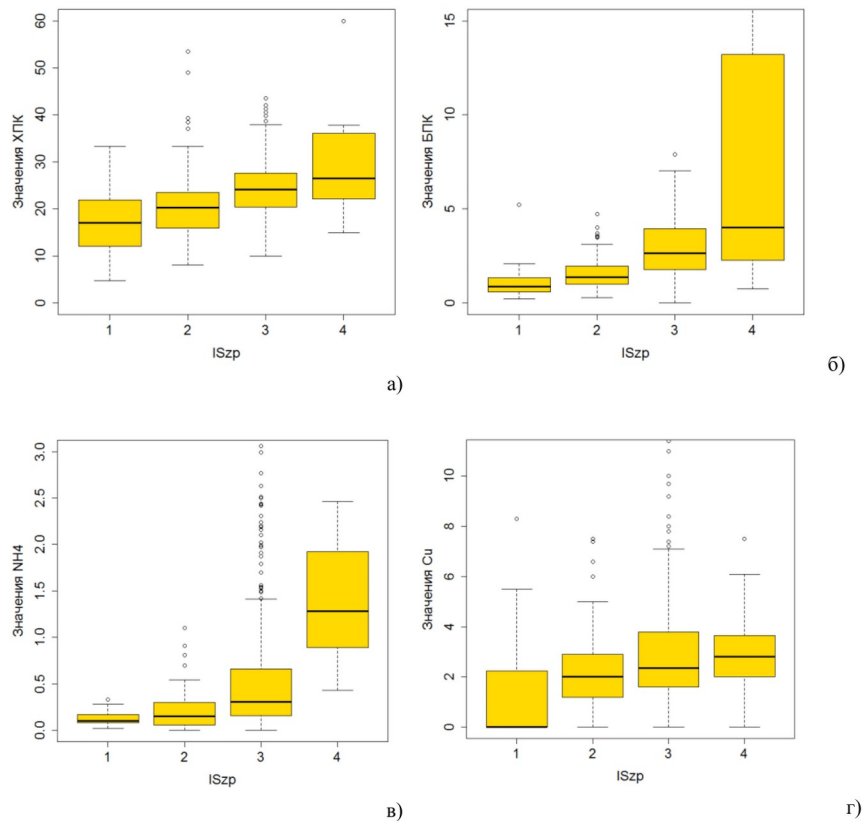


Рисунок 2 - Интервалы содержания органических веществ по ХПК (а), BPK₅ (б), азота аммонийного (в), меди (г) в зависимости от инвариантного состояния экосистемы по показателям зоопланктона
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.47.2>

Примечание: по оси абсцисс цифрами обозначены уровни инвариантного состояния: 1 – фон, 2 – антропогенное напряжение, 3 – элементы экологического регресса, 4 – экологический регресс

Зообентос, также как и фитопланктон, слабо реагирует на переход системы из состояния экологического регресса в метаболический регресс, что отражается на разделении медианных значений гидрохимических показателей в зависимости от инвариантного состояния (рис. 3).

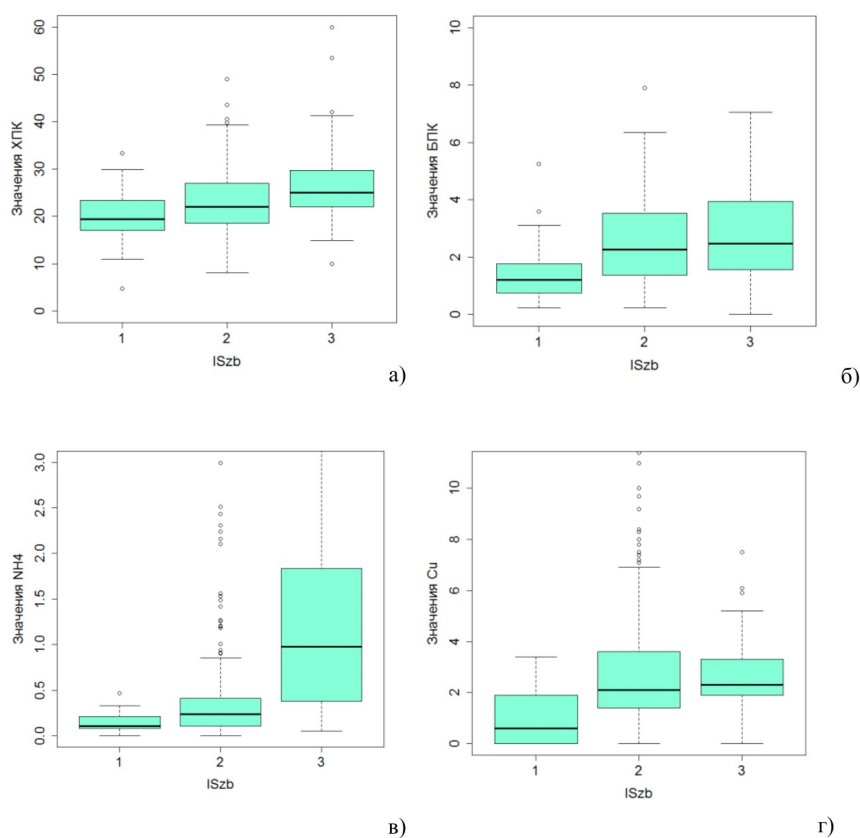


Рисунок 3 - Интервалы содержания органических веществ по ХПК (а), БПК₅ (а), азота аммонийного (в), меди (г) в зависимости от инвариантного состояния экосистемы по показателям зообентоса
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.47.3>

Примечание: по оси абсцисс цифрами обозначены уровни инвариантного состояния: 1 – фон, 2 – антропогенное напряжение, 3 – элементы экологического регресса + экологический регресс

Показатели цилиат являются хорошим биомаркером состояния загрязненных и грязных водных объектов, что показано на рис. 4. Небольшая разница медианных значений гидрохимических показателей характерна для фонового состояния экосистем и состояния антропогенного напряжения. Выделяется значительное увеличение этих значений в водоемах, отнесенных к категории экологического и метаболического регресса.

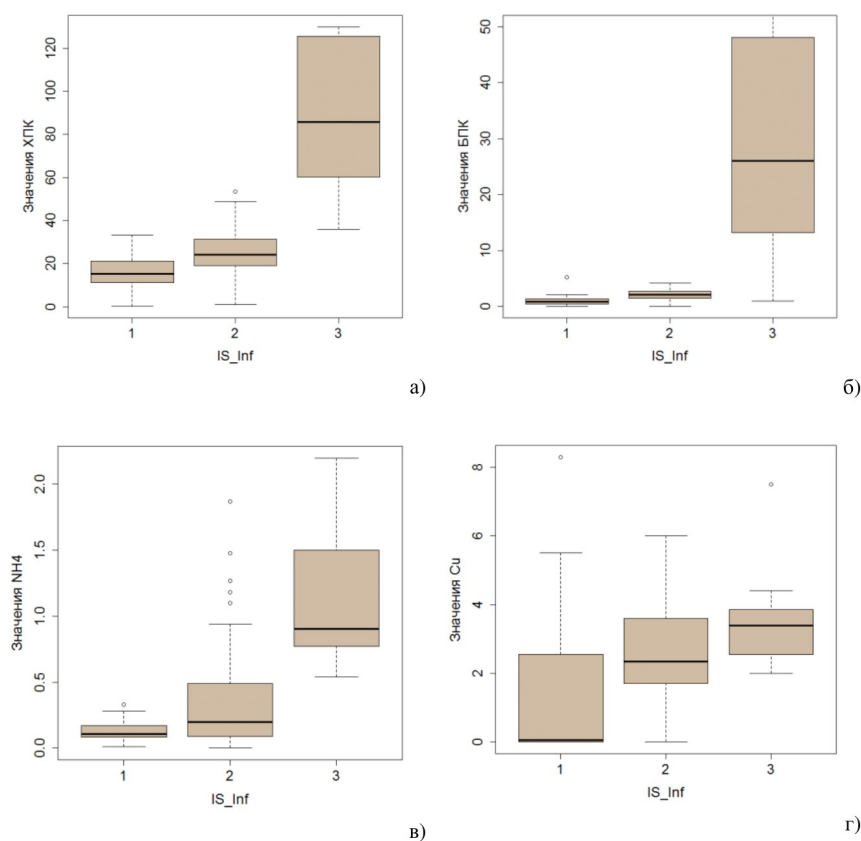


Рисунок 4 - Интервалы содержания органических веществ по ХПК (а), БПК₅ (б), азота аммонийного (в), меди (г) в зависимости от инвариантного состояния экосистемы по показателям цилиопланктона

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.47.4>

Примечание: по оси абсцисс цифрами обозначены уровни инвариантного состояния: 1 – фон, 2 – антропогенное напряжение, 3 – элементы экологического регресса + экологический регресс

На основе проведенной статистической обработки полученных данных были выделены интервалы значений приоритетных гидрохимических показателей отдельно для каждого инвариантного состояния экосистемы (табл. 1). Для фоновое состояние экосистемы содержание легкоокисляемых органических веществ по БПК₅ меньше ПДК, установленного для рыбохозяйственных водоемов. В условиях значительного антропогенного освоения водосборной территории исследованных рек, вынос органического вещества с поверхностным стоком привел к большому, выше ПДК_{рх}, содержанию трудноокисляемых органических веществ по ХПК. Содержание ионов меди также превышает ПДК_{рх}, это связано с геохимическими особенностями территории, что приводит к повышенному «фоновому» содержанию меди во всех исследованных водных объектах.

Содержание ионов аммония, как в фоновых, так и в водоемах в состоянии антропогенного напряжения ниже ПДК. Для экологического и метаболического регресса характерны превышения ПДК по все показателям.

Таблица 1 - Оценочная шкала инвариантного состояния водных экосистем по гидрохимическим показателям

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.47.5>

Состояние экосистемы	Степень загрязнения	Гидрохимические параметры			
		БПК ₅ , мгО/л	ХПК, мгО/л	NH ₄ , мг/л	Cu ²⁺ , мкг/л
Фоновое	Условно чистая → загрязненная	<1,2	<20	<0,12	<1,4
Антропогенное напряжение	Очень загрязненная	1,2<C<2,3	20<C<22	0,12<C<0,3	1,4<C<2,0
Элементы Экологическо	Грязная	2,3<C<3,0	22,5<C<26	0,3<C<0,6	2,0<C<3,4

го регресса					
Экологически йрегресс Метаболичес кий регресс	Очень грязная – Экстремально грязная	C>3,0	>26	>0,6	>3,4

Аналогичное разделение по типам инвариантного состояния экосистем было сделано для биологических показателей (табл. 2).

Показано, что хорошими биомаркерами для характеристики инвариантного состояния по цилиопланктону является число видов, численность, индекс видового разнообразия. Для фитопланктона – численность и биомасса, для зоопланктона – число видов, численность, биомасса, для зообентоса – число видов, численность.

Таблица 2 - Оценочная шкала инвариантного состояния водных экосистем по биологическим показателям

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.47.6>

Состояние экосистемы	Фоновое	Антропогенное напряжение	Элементы экологического регресса	Элементы экологического регресса и метаболический регресс
Степень загрязнения	Условно чистая → загрязненная	Очень загрязненная	Грязная	Очень грязная – Экстремально грязная
Цилиопланктон				
Число видов	2-5	>5	0-2	0
Численность млн.экз./м ³	0,01-0,5	>0,5	0,1-0,2	0
Nп	>1,0	>2,2	<1,0	0
Фитопланктон				
Численность млн.экз./м ³	>1,4	1,4<Nf<2,3	2,3<Nf<8,0	Nf>8,0
Биомасса мг/м ³	<1,2	1,2<Bf<2,3	2,3<Bf<4,3	4,3<Bf
Зоопланктон				
Число видов	0<Qzp ≤3	4 ≤Qzp ≤ 10 и выше	9 < Qzp ≤ 11 и выше	3 ≤ Qzp<7
Численность тыс.экз./м ³	Nzp <1	5 ≤Nzp ≤ 14	10≤Nzp ≤18	1 ≤ Nzp≤7
Биомасса, мг./м ³	Vzp<2.5	2,5<Vzp< 20	20<Vzp< 28	0<Vzp<8
Зообентос				
Число видов	9-17 и выше	7-9	3-6	0
Численность, тыс.экз./м ²	0,9-4,0 и выше	0,8-1,5	0,1-3,0	0

Статистическая модель связи химического состава воды и показателей гидробионтов как реакции экосистемы на изменение внешней среды

Для поиска связей между выделенными главными химическими предикторами и биологическими показателями отдельно для фито-, зоопланктона и зообентоса были построены модели мультиномиального логита.

Поскольку нами взяты 4 зависимых переменных (БПК₅, ХПК, NH₄⁻ и Cu²⁺), которые включают 4 интервала значений, соответствующих состоянию экосистемы (Q1 – фоновое, Q2 – антропогенное напряжение, Q3 – элементы экологического регресса, Q4 – метаболический, экологический регресс), то для определения вероятностей отнесения объекта (по численности N или по числу видов Q) к этим 4 категориям можно сформировать 3 недублированных логита, причём 1 категория (Q1) будет использоваться как эталонная. Тогда совокупность логит-моделей (baseline-category logit) будет иметь вид (модель 1):

$$\begin{aligned}
 g_1 &= \ln(\pi_1/\pi_1) = 0, \quad \pi_1 = 1 - (\pi_2 + \pi_3 + \pi_4) \\
 g_2 &= \ln(\pi_2/\pi_1) = \alpha_2 + \beta_2 X \\
 g_3 &= \ln(\pi_3/\pi_1) = \alpha_3 + \beta_3 X \\
 g_4 &= \ln(\pi_4/\pi_1) = \alpha_4 + \beta_4 X
 \end{aligned}$$

где π_j вероятность того, насколько предпочтительно присвоение произвольному объекту метки класса j. X – независимая переменная (либо N-суммарная численность, либо Q – число видов, либо B – суммарная биомасса).

Рассматривая в качестве зависимой переменной БПК₅, а независимой переменной X численность, биомассу, число видов гидробионтов, получаем следующие значимые коэффициенты модели (1) (табл. 3).

Таблица 3 - Коэффициенты логит модели при независимой переменной БПК₅DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.47.7>

Категория	Коэффициенты		p-значения на основе теста Вальда	
	α_j (Intercept)	β_j	α_j (Intercept)	β_j
Численность зоопланктона				
Q2	0,17213536	0,007348934	0,263529700	0,0121306081
Q3	-0,58519142	0,008172713	0,001451651	0,0061024539
Q4	-0,09033194	0,010454177	0,574739059	0,0003138126
Число видов зоопланктона				
Q2	-0,3442828	0,09167911	2,081418e-02	2,553238e-03
Q3	-1,5012390	0,13793464	1,319017e-05	6,795876e-05
Q4	-1,1035093	0,16881321	1,946375e-04	3,978071e-08
Число видов фитопланктона				
Q2	-0,8675664	0,04509488	0,0035127250	0,01557266
Q3	-1,0275592	0,05258722	0,0006995803	0,00495290
Q4	-1,1442695	0,06729152	0,0001260606	0,00019671
Биомасса фитопланктона				
Q2	-0,5853540	0,1029370	4,036171e-04	7,729969e-04
Q3	-0,8920084	0,1347561	2,493293e-07	7,102055e-06
Q4	-0,9008073	0,1437082	1,846181e-07	1,627621e-06
Биомасса зообентоса				
Q2	0,5113953	0,008964565	-0,5113953	0,008964565
Q3	-0,6070980	0,009310865	-0,6070980	0,009310865
Q4	-0,4315975	0,008974466	-0,4315975	0,008974466

Анализируя коэффициенты, можно заметить, что численность и число видов зоопланктона, число видов и биомасса фитопланктона, а также биомасса зообентоса увеличивается при переходе от категории Q1 к категориям Q2, Q3 и снижается при дальнейшем переходе к Q4. Все коэффициенты при независимой переменной статистически значимы.

Рассматривая в качестве зависимой переменной ХПК, а независимой переменной X численность, биомассу число видов групп гидробионтов, получаем следующие значимые коэффициенты модели (1) (табл. 4).

Таблица 4 - Коэффициенты логит модели при независимой переменной ХПК

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.47.8>

Категория	Коэффициенты		p-значения на основе теста Вальда	
	α_j (Intercept)	β_j	α_j (Intercept)	β_j
Число видов зоопланктона				
Q2	-0,4969706	0,05859616	0,04371748	0,04371748
Q3	-0,5301726	0,05802088	0,04880583	0,032446113
Q4	-0,7122237	0,07609687	0,01256325	0,01216185
Число видов зообентоса				
Q2	0,3272833	-0,01617618	0,19725900	0,44274466
Q3	-0,1197736	-0,01198983	0,67052310	0,60698818
Q4	0,5926468	-0,05800079	0,02131093	0,01216185

Анализируя коэффициенты, можно заметить, что число видов зоопланктона закономерно увеличивается при переходе от категории Q1 к категориям Q2, Q3, Q4, а число видов зообентоса уменьшается. Однако только третий коэффициент в таблице, характеризующий число видов зообентоса, статистически значим.

Рассматривая в качестве зависимой переменной NH_4 , а независимой переменной X численность, биомассу число видов групп гидробионтов, получаем следующие значимые коэффициенты модели (1) (табл. 5).

Таблица 5 - Коэффициенты логит-модели при независимой переменной NH_4 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.47.9>

Категория	Коэффициенты		p-значения на основе теста Вальда	
	α_j (Intercept)	β_j	α_j (Intercept)	β_j
Число видов зоопланктона				
Q2	-0,6631983	0,08639962	0,017099886	0,0007313045
Q3	-0,9195684	0,06624728	0,002922628	0,002922628
Q4	0,0715110 -	-0,01324632	0,79276805*	0,6371094290*
Число видов фитопланктона				
Q2	-0,6049099	0,034964048	0,03998080	0,03054309
Q3	-0,7752531	-0,002368037	0,03188750	0,91150441*
Q4	0,6304148	-0,039089857	0,02297215	0,02572796
Число видов зообентоса				
Q2	-0,06106748	0,02162308	0,813302409*	0,2910704582*
Q3	0,20654497	-0,05338239	0,060102473	0,0361728354
Q4	0,69529834	-0,08189699	0,007705239	0,0009815952

Примечание: *- коэффициенты не значимы

Анализируя остальные коэффициенты, можно заметить, что число видов гидробионтов увеличивается при переходе от категории Q1 к категориям Q2, Q3 и начинает снижаться при переходе к категории Q4.

Рассматривая в качестве зависимой переменной Cu^{2+} , а независимой переменной X численность, биомассу число видов групп гидробионтов, получаем следующие значимые коэффициенты модели (1) (табл. 6).

Таблица 6 - Коэффициенты логит-модели при независимой переменной Cu^{2+} DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.47.10>

Категория	Коэффициенты		p-значения на основе теста Вальда	
	α_j (Intercept)	β_j	α_j (Intercept)	β_j
Число видов зоопланктона				
Q2	-0,5622712	0,05340661	4,061118e-02	5,853669e-02
Q3	-0,9559745	0,10104604	7,054292e-04	2,360975e-04
Q4	-1,2919422	0,12389183	1,422073e-05	9,865713e-06
Число видов фитопланктона				
Q2	-0,7289491	0,0006017818	0,9912885*	0,48755566*
Q3	-1,0031341	0,0309536576	0,9996465*	0,03699848
Q4	-1,0894030	0,0471975543	0,9999292*	0,00189902
Биомасса зообентоса				
Q2	0,32200021	-0,045978276	0,0212311	0,04597335
Q3	0,24607096	-0,050993378	0,0354476	0,03415627
Q4	-0,02864323	0,006107941	0,9104870*	0,76673592*

Примечание: *- коэффициенты не значимы

Анализируя остальные коэффициенты, можно заметить, что число видов зоопланктона и зообентоса снижается при переходе от категории Q1 к категориям Q2, Q3 Q4. Число видов фитопланктона может варьировать, но закономерно снижается при переходе в категорию Q4.

Обсуждение

Оценка инвариантного состояния отдельных водных объектов Республики Татарстан по утвержденным методикам, проводилась ранее [8], [9], [10]. На основе анализа абиотических и биотических компонентов, было выявлено, что все

водные объекты испытывают разные степени антропогенного воздействия. При этом было показано, что все они находятся в разных инвариантных состояниях.

Разработанная комплексная шкала предложена впервые. Ранее была предложена предварительная оценочная шкала уровня экологического регресса по показателям цилиопланктона [10]. Последняя была применена нами при разработке комплексной шкалы.

Построенная модель зависимости биотических факторов от абиотических была выполнена впервые. Она способна на основе предложенных коэффициентов прогнозировать переход экосистемы из одного инвариантного состояния в другое. В данную модель не вошли показатели развития инфузорий. Однако данная модель была разработана нами ранее [11]. В основу модели положен индекс видового разнообразия (H) инфузорий и 7 наиболее значимых химическими предикторов природного и антропогенного происхождения. Модель позволила успешно прогнозировать отнесение качества воды исследуемого водоема к категории «чисто/грязно».

Предложенная шкала позволит оценивать инвариантное состояние экосистемы в целом как по гидрохимическим, так и гидробиологическим показателям, что важно для целей комплексного мониторинга водных объектов.

Заключение

В ходе проведенного статистического анализа были выделены 4 гидрохимических показателя (содержание органических веществ по ХПК и БПК₅, аммонийного азота и меди), которые оказались наиболее показательными в оценке, как качества воды исследованных водных объектов, так и инвариантного состояния водных сообществ. С 95% вероятностью были выделены интервалы медианных значений вышеуказанных показателей, соответствующие определенному инвариантному состоянию по показателям фито-, зоопланктона, зообентоса, цилиат. Для поиска связей между выделенными главными химическими и биологическими показателями отдельно для фито-, зоопланктона и зообентоса были построены модели мультиномиального логита. Построенная модель показала, что наилучшими предикторами для прогноза отнесения водоема к соответствующему инвариантному состоянию являются число видов зоопланктона (разделение по величине БПК₅, ХПК, ионов меди), число видов фитопланктона (разделение по величине БПК₅), число видов зообентоса (разделение по ХПК, ионам аммония), число видов, численность и биомасса зообентоса при разделение на инвариантные состояния по БПК₅.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках научного проекта №18-44-160027.

Funding

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research and the Government of the Republic of Tatarstan within the framework of the scientific project No. 18-44-160027.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Сообщество рецензентов Международного научно-исследовательского журнала
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.47.11>

Review

International Research Journal Reviewers Community
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.132.47.11>

Список литературы / References

1. Булгаков Н.Г. Индикация состояния природных экосистем и нормирование факторов окружающей среды. Обзор существующих подходов. / Н.Г. Булгаков // Успехи современной биологии. — 2002. — 122(2). — с. 115-135.
2. Абакумов В.А. Экологические модификации и развитие гидробиоценозов. / В.А. Абакумов // Труды Международного симпозиума «Экологические модификации и критерии экологического нормирования»; — Л.: Гидрометеиздат, 1991. — с. 18-40.
3. РД 52.24.661-2004. Рекомендации. Оценка риска антропогенного воздействия приоритетных загрязняющих веществ на поверхностные воды суши. — М.: Метеоагентство Росгидромета, 2006. — 25 с.
4. РД 52.24.620-2000. Методические указания. Охрана природы. Гидросфера. Организация и функционирование специальной подсистемы мониторинга антропогенного эвтрофирования пресноводных экосистем. — СПб.: Гидрометеиздат, 2001. — 40 с.
5. РД 52.24.633-2002. Методические основы создания и функционирования подсистемы мониторинга экологического регресса пресноводных экосистем. — СПб.: Гидрометеиздат, 2002. — 32 с.
6. Шитиков В.К. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации / В.К. Шитиков, Г.С. Розенберг, Т.Д. Зинченко — Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. — 463 с.
7. The Comprehensive R Archive Network. — URL: <https://cran.r-project.org/> (accessed 28.10.2022).
8. Жданова Г.Н. Региональные особенности оценки состояния водных экосистем Республики Татарстан. / Г.Н. Жданова, Т.А. Кондратьева, С.Д. Захаров // Региональные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды; — Казань: КФУ, 2012. — с. 274-275.
9. Кондратьева Т.А. Экологические модификации гидробиоценозов Куйбышевского водохранилища в пределах Республики Татарстан. / Т.А. Кондратьева // Вода: химия и экология. — 2013. — 5. — с. 8-14.
10. Кондратьева Т.А. Экологические модификации цилиопланктона водных объектов Республики Татарстан. / Т.А. Кондратьева // Вода: химия и экология. — 2016. — 4. — с. 10-16.

11. Kondrateva T.A. Using Cilioplankton as an Indicator of the Ecological Condition of Aquatic Ecosystems. / T.A. Kondrateva // *Geosciences*. — 2019. — 9 (11). — p. 464. — DOI: 10.3390/geosciences9110464

Список литературы на английском языке / References in English

1. Bulgakov N.G. Indikaciya sostoyaniya prirodny'x e'kosistem i normirovanie faktorov okruzhayushhej sredy'. Obzor sushhestvuyushhix podxodov [Indication of the State of Natural Ecosystems and Regulation of Environmental Factors. Review of Existing Approaches]. / N.G. Bulgakov // *Uspexi sovremennoj biologii* [Advances in Modern Biology]. — 2002. — 122(2). — p. 115-135. [in Russian]

2. Abakumov V.A. E'kologicheskie modifikacii i razvitie gidrobiocenozov [Ecological Modifications and Development of Hydrobiocenoses]. / V.A. Abakumov // *Proceedings of the International Symposium "Environmental Modifications and Criteria for Environmental Regulation"*; — L.: Gidrometeoizdat, 1991. — p. 18-40. [in Russian]

3. RD 52.24.661-2004. Rekomendacii. Ocenka riska antropogenogo vozdejstviya prioritetnyh zagryaznyayushchih veshchestv na poverhnostnye vody sushi [RD 52.24.661-2004. Recommendations. Assessment of the risk of anthropogenic impact of priority pollutants on the surface waters of the land]. — M.: Meteoagency of Roshydromet, 2006. — 25 p. [in Russian]

4. RD 52.24.620-2000. Metodicheskie ukazaniya. Ohrana prirody. Gidrosfera. Organizaciya i funkcionirovanie special'noj podsistemy monitoringa antropogenogo evtrofirovaniya presnovodnyh ekosistem [RD 52.24.620-2000. Methodical instructions. Protection of Nature. Hydrosphere. Organization and functioning of a special subsystem for monitoring anthropogenic eutrophication of freshwater ecosystems]. — St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2001. — 40 p. [in Russian]

5. RD 52.24.633-2002. Metodicheskie osnovy sozdaniya i funkcionirovaniya podsistemy monitoringa ekologicheskogo regressa presnovodnyh ekosistem [RD 52.24.633-2002. Methodological bases for the creation and functioning of the subsystem for monitoring the ecological regression of freshwater ecosystems]. — St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2002. — 32 p. [in Russian]

6. Shitikov V.K. Kolichestvennaya gidroe'kologiya: metody' sistemnoj identifikacii [Quantitative Hydroecology: Methods of System Identification] / V.K. Shitikov, G.S. Rozenberg, T.D. Zinchenko — Tol'yatti: IE'VB RAN, 2003. — 463 p. [in Russian]

7. The Comprehensive R Archive Network. — URL: <https://cran.r-project.org/> (accessed 28.10.2022).

8. Zhdanova G.N. Regional'ny'e osobennosti ocenki sostoyaniya vodny'x e'kosistem Respubliki Tatarstan [Regional Features of Assessing the State of Aquatic Ecosystems in the Republic of Tatarstan]. / G.N. Zhdanova, T.A. Kondrat'eva, S.D. Zaxarov // *Regional Problems of Hydrometeorology and Environmental Monitoring*; — Kazan': KFU, 2012. — p. 274-275. [in Russian]

9. Kondrat'eva T.A. E'kologicheskie modifikacii gidrobiocenozov Kujby'shevskogo vodoxranilishha v predelax Respubliki Tatarstan [Ecological Modifications of Hydrobiocenoses of the Kuibyshev Reservoir within the Republic of Tatarstan]. / T.A. Kondrat'eva // *Voda: ximiya i e'kologiya* [Water: Chemistry and Ecology]. — 2013. — 5. — p. 8-14. [in Russian]

10. Kondrat'eva T.A. E'kologicheskie modifikacii cilioplanktona vodny'x ob'ektov Respubliki Tatarstan [Ecological Modifications of Cilioplankton in Water Bodies of the Republic of Tatarstan]. / T.A. Kondrat'eva // *Voda: ximiya i e'kologiya* [Water: Chemistry and Ecology]. — 2016. — 4. — p. 10-16. [in Russian]

11. Kondrateva T.A. Using Cilioplankton as an Indicator of the Ecological Condition of Aquatic Ecosystems. / T.A. Kondrateva // *Geosciences*. — 2019. — 9 (11). — p. 464. — DOI: 10.3390/geosciences9110464