

ISSN 1029-8940 (Print)
ISSN 2524-230X (Online)
УДК 574.5, 574.583
<https://doi.org/10.29235/1029-8940-2026-71-2-157-166>

Поступила в редакцию 19.11.2025
Received 19.11.2025

А. Ю. Карпаева

*Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по биоресурсам,
Минск, Республика Беларусь*

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОЗЕР БЕЛОРУССКОГО ПООЗЕРЬЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНДЕКСА Q ФИТОПЛАНКТОННОГО СООБЩЕСТВА

Аннотация. В работе представлены результаты оценки экологического состояния 11 озер Белорусского Поозерья различного трофического статуса с использованием индекса Q фитопланктонного сообщества в вегетационные сезоны 2023–2025 гг. Изучены сезонная динамика индекса и его взаимосвязь с ключевыми показателями трофности. Установлено, что индекс Q варьировал в широком диапазоне (от 0,11 до 4,03), демонстрируя сезонную изменчивость: повышение от весны к лету и снижение к осени, что отражает сезонную сукцессию фитопланктона. Наиболее высокие средние значения индекса, соответствующие хорошему качеству вод, зафиксированы в мезотрофных озерах Волос Северный, Волос Южный, тогда как минимальные характерны для гиперэвтрофных озер Великое, Ильменок. Корреляционный анализ выявил статистически значимые отрицательные связи индекса Q с биомассой фитопланктона ($\rho = -0,67$) и концентрацией общего фосфора ($\rho = -0,50$), а также положительную связь с прозрачностью воды ($\rho = +0,68$). Отсутствие значимой корреляции с долей сине-зеленых водорослей подчеркивает комплексный характер индекса, учитывающего вклад всех функциональных групп. Показано, что в гиперэвтрофных озерах индекс стабильно низок вне зависимости от сезона, в то время как в водоемах с более низким трофическим статусом он чувствителен к сезонным перестройкам сообщества. Полученные результаты подтверждают диагностическую ценность Q-индекса как интегрального показателя трофического статуса, но указывают на необходимость учета его сезонной динамики и ограничений, связанных с доминированием отдельных таксонов.

Ключевые слова: фитопланктон, трофический статус, индекс Q, Белорусское Поозерье, качество воды

Для цитирования: Карпаева, А. Ю. Оценка экологического состояния озер Белорусского Поозерья с использованием индекса Q фитопланктонного сообщества / А. Ю. Карпаева // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук. – 2026. – Т. 71, № 2. – С. 157–166. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2026-71-2-157-166>

Anastasiya Yu. Karpaeva

Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources, Minsk, Republic of Belarus

ASSESSMENT OF THE ECOLOGICAL STATE OF LAKES IN THE BELARUSIAN LAKE REGION USING THE Q INDEX OF THE PHYTOPLANKTON COMMUNITY

Abstract. The article presents the results of an assessment of the ecological state of 11 lakes of the Belarusian Lake Region with different trophic status using the Q index of the phytoplankton community during the seasons of 2023–2025. The seasonal dynamics of the index and its relationship with key trophic indicators were examined. The Q index was found to vary widely (from 0.11 to 4.03), demonstrating seasonal variability: increasing from spring to summer and decreasing towards autumn, which reflects the seasonal succession of phytoplankton. The highest average index values, corresponding to good water quality, were recorded in mesotrophic lakes Volos Severny, Volos Yuzhny, while the lowest were typical of hypertrophic lakes Velikoye, Ilmenok. Correlation analysis revealed statistically significant negative correlations of the Q index with phytoplankton biomass ($\rho = -0.67$) and total phosphorus concentration ($\rho = -0.50$), and a positive correlation with water transparency ($\rho = +0.68$). The absence of a significant correlation with the proportion of cyanobacteria emphasizes the integrated nature of the index, which accounts for the contribution of all functional groups. It was shown that in hypertrophic lakes, the index remains consistently low regardless of the season, whereas in water bodies with a lower trophic status, it is sensitive to seasonal community rearrangements. The obtained results confirm the diagnostic value of the Q index as an integrative indicator of trophic status, but also highlight the need to consider its seasonal dynamics and limitations associated with the dominance of certain taxa.

Keywords: phytoplankton, trophic status, Q index, Belarusian Lake Region, water quality

For citation: Karpaeva A. Yu. Assessment of the ecological state of lakes in the Belarusian Lake Region using the Q index of the phytoplankton community. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya byalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2026, vol. 71, no. 2, pp. 157–166 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2026-71-2-157-166>

Введение. В современных условиях интенсивной антропогенной нагрузки, связанной с ростом населения, урбанизацией и химизацией сельского хозяйства, проблема сохранения качества пресноводных экосистем приобретает особую актуальность. Наряду с традиционными физико-

химическими методами контроля все более востребованными становятся биоиндикационные подходы, позволяющие интегрировать влияние комплекса факторов на водные экосистемы. Особое место среди биологических индикаторов занимает фитопланктон, оперативно реагирующий на изменения трофического статуса и уровня загрязнения водоемов [1].

В контексте реализации принципов Водной рамочной директивы Европейского союза перспективным инструментом экологической оценки является индекс сообществ (Q-индекс), основанный на анализе функциональных групп фитопланктона [2], которые учитывают физиологические, морфологические и экологические особенности видов, определяющие их способность доминировать в конкретных условиях. Предполагается, что изменения в соотношении функциональных групп в ответ на изменение концентрации биогенных элементов потенциально более показательно, чем реакция отдельных видов, или родов.

Расчет индекса Q основан на определении относительного вклада функциональных групп в общую биомассу фитопланктона с учетом специальных весовых коэффициентов (*F*-факторов), адаптированных для конкретных типов водоемов [3].

Ключевым преимуществом Q-индекса, помимо возможности оценки трофического статуса, является его способность отражать экологическое качество водоема через соотношение индикаторных групп фитопланктона. А также, поскольку индикаторные группы выделены на основании их приуроченности к определенной комбинации свойств окружающей среды, Q-индекс может быть использован для тестирования таких мониторинговых систем, которые базируются на определенных местообитаниях, что недоступно при анализе только общей биомассы.

Целью настоящего исследования явилась оценка взаимосвязи Q-индекса с параметрами, традиционно используемыми для характеристики трофического статуса и уровня загрязнения водоемов.

Для этого анализировалась корреляция индекса с биомассой фитопланктона как прямым показателем трофности, прозрачностью воды, уровнем содержания общего фосфора (Р, мг/дм³), а также с долей сине-зеленых водорослей, которые рассматриваются в качестве индикаторов загрязнения и эвтрофирования. Полученные результаты позволят определить диагностическую ценность Q-индекса для комплексной экологической оценки озер Белорусского Поозерья.

Материалы и методы исследования. Проведен анализ таксономического состава и биомассы фитопланктона в 66 пробах, собранных на 11 озерах разного трофического статуса Белорусского Поозерья с мая по сентябрь 2023–2025 гг.

Пробы из четырех озер Ушачшской группы (Чертсвятское, Вечелье, Отолово, Кривое) отбирали в 2023 г. три раза за сезон: в поздневесенний, раннелетний и позднелетний периоды. Пробы из пяти озер Браславской группы (Потех, Горушка, Обстерно, Волос Северный, Волос Южный) и пробы из гиперэвтрофных озер Ильменок и Великое отбирали в 2024 и 2025 гг. также три раза: в поздневесенний, летний и позднелетний периоды.

Морфометрические и некоторые биологические характеристики озер представлены в табл. 1.

Таблица 1. Морфометрические и некоторые биологические характеристики озер разного трофического статуса Белорусского Поозерья [4]

Table 1. Morphometric and some biological characteristics of lakes of different trophic status in the Belarusian Lake District [4]

Озеро	Площадь озера, км ²	Объем озера, км ³	Максимальная глубина, м	Средняя глубина, м	Прозрачность, м	Общая биомасса фитопланктона, мг/л
Чертсвятское	9,93	0,021	4,3	2,2	0,7	48,65
Вечелье	1,36	0,025	35,9	18,5	2,37	3,29
Отолово	8,2	0,028	16,4	3,5	2,67	8,43
Кривое	4,5	0,043	31,5	9,6	5,17	0,85
Потех	1,35	0,452	9,1	3,5	1,2	6,29
Горушка	0,18	0,0005	6,9	2,8	1,83	4,85
Обстерно	9,89	0,05	12	5,1	2,37	1,003
Волос Северный	4,21	0,031	29,2	7,3	5,27	0,46
Волос Южный	1,21	0,015	40,4	12,5	6,17	0,69
Ильменок	0,21	0,0006	6,4	3	1	46,8
Великое	0,89	0,003	5,7	2,5	0,36	23,07

Отбор образцов проводили батометром системы Молчанова объемом 8 л последовательно с поверхности, глубин одной и двух прозрачностей, смешивая затем в одну интегральную пробу. Также отбирали одну поверхностную пробу. Пробы воды фиксировали раствором Люголя в модификации Михеевой [5]. Концентрировали фитопланктон методом отстаивания от изначального объема 0,5 л.

Для подсчета численности использовали стандартные гидробиологические методы [6].

Биомассу определяли обычным счетно-объемным методом [5].

Видовой состав фитопланктона устанавливали с помощью светового микроскопа Axiostar Plus (Carl ZEISS, Германия) при увеличении $\times 100$, $\times 200$ и $\times 400$.

Видовую идентификацию проводили с помощью отечественных [7] и зарубежных определителей [8].

Оценку качества воды осуществляли с помощью индекса сообществ Q [2]:

$$Q_{i=1}^n = \sum p_i \cdot F,$$

где p_i – доля биомассы i -й функциональной группы в общей биомассе фитопланктона; F – коэффициент этой группы в исследуемом типе водоемов (фактор F), установленный для i -й функциональной группы.

Q-индекс рассчитывали для каждой пробы в каждый из сезонов с последующим осреднением для каждого озера. Соответствие видов кодам различных функциональных групп проводили согласно предложенным классификациям [2, 3, 5]. Диапазон значений коэффициента F (номера фактора) для выявленных функциональных ассоциаций водорослей в планктоне озер Белорусского Поозерья заимствовали из типологии, разработанной для европейских озер 5-го типа, которые являются постоянными и имеют площадь акватории менее 10 км² и глубину более 0,5 м [3].

Величина фактора F в таких водоемах варьирует от 0 до 5. Его наибольшее значение (5) присваивают комплексам видов, обитающих в стабильных природных условиях, неизмененных при внешнем воздействии, а самое низкое (0) – тем, что обитают в сильно нарушенных экосистемах.

При плохом качестве поверхностных вод индекс Q приобретает наименьшие значения – 0–1, при удовлетворительном – 1–2, при умеренном – 2–3, при хорошем – 3–4 и при высоком – 4–5 [9].

При оценке связи индекса Q с другими параметрами качества воды и уровня трофности использовали его значения, рассчитанные по совокупности всех видов, обнаруженных в пробе, имеющих код отдельных функциональных групп и составляющих более 2 % в общей доле биомассы всех видов. Оценку связи биотических и абиотических параметров осуществляли с помощью коэффициента детерминации для линейной регрессии и коэффициента ранговой корреляции Спирмена и Кендалла.

Результаты и их обсуждение. Исследование фитопланктонных сообществ в озерах Белорусского Поозерья показало выраженную сезонную изменчивость индекса Q, сопровождающуюся сменой доминирующих таксонов и функциональных групп.

В поздневесенний период в большинстве эвтрофных водоемов доминировали сине-зеленые водоросли (*Aphanizomenon flos-aquae* (L.) Ralfs ex Bornet & Flahault, 1888; *Limnothrix planctonica* (Wołoszyńska) Meffert, 1987; *Geitlerinema lemmermannii* (Wołoszyńska) Anagnostidis, 1989), относящиеся к функциональным группам H₁ и S₁ по Рейнольдсу [2]. Их массовое развитие указывает на эвтрофные условия с высоким содержанием биогенных элементов (преимущественно азота), а также на состояния с сильным дефицитом света, что способствует снижению индекса Q. Одновременно в отдельных озерах возрастала роль криптофитовых (*Cryptomonas ovata* Ehrenberg, 1832; *Rhodomonas pusilla* (H. Bachmann) Javornicky, 1967), относящихся к группе Y, а также диатомовых водорослей (*Stephanodiscus hantzschii* Grunow, 1880; *Synedra acus* Kützing, 1844; *Cyclotella* (F. T. Kützing) A. de Brébisson, 1838 sp.) из групп A, C и D. В некоторых мезотрофных озерах (Волос Северный, Волос Южный, Кривое) преобладали виды *Dinobryon divergens* O. E. Imhof, 1887 и *Dinobryon bavaricum* Imhof, 1890, относящиеся к группе E, которая характеризует олиготрофные озера с низким содержанием биогенных элементов [10, с. 9].

В раннелетний период во многих мезотрофных озерах происходила смена доминантов: усиливалась роль мелкоклеточных сине-зеленых водорослей (*Aphanotece clatrata* West & G. S. West, 1906; *Microcystis Lemmermann*, 1907 sp.). В эвтрофных и гиперэвтрофных озерах Чертсвятское,

Великое продолжали доминировать виды-азотфиксаторы (*Aphanizomenon flos-aqua* и *Limnothrix planctonica*), в озерах Потех, Великое также доминировали эвгленовые водоросли (*Trachelomonas* Ehrenberg, 1833 sp.; *Phacus* Dujardin, 1841 sp.) из групп W₂, W₁, которые ассоциированы с высоким содержанием органического вещества и биологическим потреблением кислорода (БПК). В некоторых озерах массово развивались некоторые диатомовые водоросли (например, *Melosira granulata* (Ehrenberg) Ralfs, 1861 из группы P в оз. Горушка).

В мезотрофных озерах Вечелье, Отолово также наблюдался пик диатомовых водорослей, но за счет вида *Stephanodiscus* sp. из группы D, которая свидетельствует о повышенном содержании биогенных элементов.

В мезотрофных с чертами олиготрофии озерах (например, Кривое, Волос Северный) заметную долю сохраняли криптофитовые и золотистые водоросли (*Dinobryon divergens*, группа E), что поддерживало значения Q-индекса на уровне ближе к хорошему.

В позднелетний период картина вновь менялась. В ряде водоемов, прежде всего в Чертсвятском и Потехе, наблюдалось устойчивое доминирование азотфиксирующих сине-зеленых водорослей (*Planktolynghya limnetica*, *Aphanizomenon flos-aquae*, *Limnothrix planctonica*), что привело к снижению индекса Q до минимальных значений и падению качества воды до плохого. В то же время в озерах Кривое, Волос Южный и Волос Северный наблюдались значительные биомассы криптофитовых и мелкоклеточные формы сине-зеленых водорослей, таких как *Aphanotece clatrata* (группа K), что обеспечивало значения индекса Q ближе к хорошему.

Как видно из табл. 2, индекс Q колебался в пределах от очень низких значений (0,11 – в оз. Ильменок в раннелетний период, что соответствует плохому качеству воды) до относительно высоких (4,03 – в оз. Горушка и 3,10 – в оз. Волос Северный в раннелетний период, что соответствует хорошему качеству воды).

Таблица 2. Сезонные значения индекса Q для озер разного трофического статуса

Table 2. Seasonal values of the Q index for lakes of different trophic status

Озеро	Поздневесенний период	Раннелетний период	Позднелетний период	Доминирующие группы**
	Значение индекса Q*			
Чертсвятское	1,34	1,24	1,25	H ₁ , D
Вечелье	1,79	2,79	3,00	H ₁ , S ₁ ; D, W ₂
Отолово	2,93	2,40	1,31	Y, D, K, H ₁
Кривое	1,90	2,29	2,74	D, K, P, E
Потех	1,55	3,46	1,50	D, K, E, W ₂
Горушка	1,96	4,03	2,02	H ₁ , D, K, W ₂
Обстерно	2,07	2,71	1,91	Y, D, E
Волос Северный	2,28	3,51	3,10	Y, E, K
Волос Южный	2,00	2,83	2,58	Y, E, K
Великое	1,64	0,98	1,18	Y, E, D, Lm, H ₁
Ильменок	2,24	0,11	1,83	D, E, H ₁ , J

Примечание. * – 0–1 – плохое значение, 1–2 – удовлетворительное; 2–3 – умеренное, 3–4 – хорошее и 4–5 – высокое. ** – D – мелководные водоемы с мутной водой и большим количеством биогенных элементов. Хорошо перемешаны; E – обычно небольшие олиготрофные водоемы с низким содержанием питательных веществ, дефицитом CO₂; J – мелководные, обогащенные биогенными элементами озера, адаптирующиеся к низкой освещенности; H₁ – водоемы с плохим освещением и низким общим фосфором. Организмы способны к азотфиксации; K – водоемы с большим количеством биогенных элементов, с устойчивым перемешиванием; Lm – эвтрофные водоемы с очень низким содержанием углерода; S₁ – водоемы с сильным дефицитом света; W₂ – мелководные мезотрофные озера; Y – чаще небольшие водоемы с низким уровнем освещенности.

Средние сезонные значения индекса Q изменялись от 1,97 ± 0,4 поздней весной до 2,4 ± 1,1 к раннему лету, а к осени снова незначительно понижались до 2,03 ± 0,68 (рис. 1).

Максимальные средние значения Q-индекса за весь период наблюдений были зарегистрированы в оз. Волос Северный (в среднем 2,96 ± 0,5), что соответствует хорошему качеству вод. Минимальные средние значения (около 1,2–1,4) получены для гиперэвтрофных озер Великое, Ильменок и Чертсвятское, что указывает на низкое качество вод.

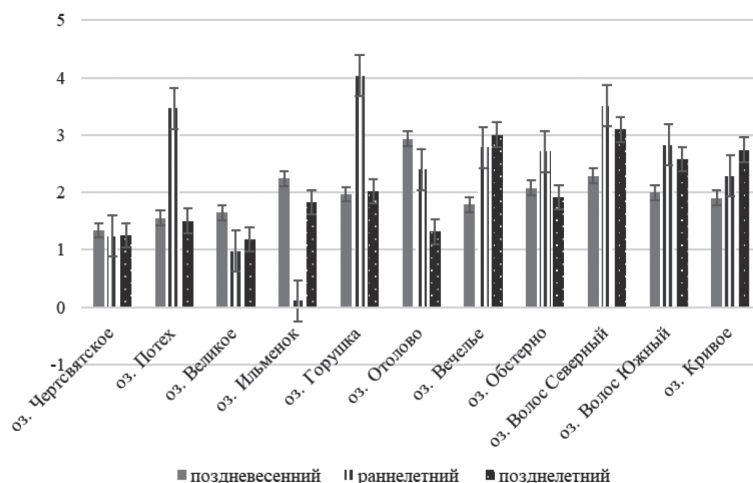


Рис. 1. Сезонные колебания индекса Q в озерах разного трофического статуса

Fig. 1. Seasonal fluctuations of the Q index in lakes of different trophic status

Важной задачей исследования являлась проверка того, насколько индекс Q фитопланктонного сообщества соотносится с основными экологическими параметрами озер Белорусского Поозерья, отражающими их трофический статус. Для этого были использованы данные по биомассе фитопланктона, прозрачности воды, уровню общего фосфора и относительной доле сине-зеленых водорослей в биомассе.

Так как распределение показателей не соответствовало нормальному, для анализа связей применялись непараметрические коэффициенты ранговой корреляции Спирмена и Кендэлла.

Рассчитанные коэффициенты показали, что индекс Q статистически значимо связан с тремя из четырех рассмотренных параметров.

Наиболее выраженной оказалась отрицательная зависимость между Q-индексом и биомассой фитопланктона ($\rho = -0,669$; $\tau = -0,5$; $p < 0,001$). Это указывает на то, что при увеличении биомассы индекс Q снижается, что отражает переход к более эвтрофному состоянию и ухудшение качества воды.

На графике «Индекс Q–биомасса» (рис. 2) прослеживается четкая нисходящая тенденция. При низкой биомассе (менее 2–3 мг/л) значения Q остаются на уровне 2,5–4,0, что соответствует умеренному или хорошему качеству воды. При биомассе свыше 10–15 мг/л индекс Q падает до значений ниже 1,5, что отражает эвтрофные и гиперэвтрофные состояния.

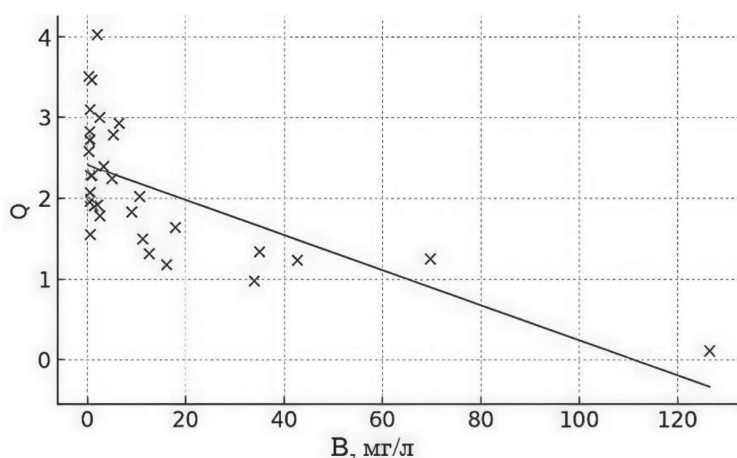


Рис. 2. Зависимость индекса Q от биомассы фитопланктона

Fig. 2. Dependence of the Q index on phytoplankton biomass

Зависимость индекса Q от прозрачности воды носит противоположный характер: была выявлена достоверная положительная корреляция ($\rho = +0,682$; $\tau = +0,506$; $p < 0,01$).

Диаграмма «Индекс Q–прозрачность» (рис. 3) демонстрирует обратную картину: наибольшие значения индекса наблюдаются при прозрачности более 5 м (озера Волос Северный, Волос Южный, Горушка), тогда как при прозрачности менее 1 м значения Q не превышают 1,5.

Таким образом, при большей прозрачности значения индекса выше, что согласуется с представлениями о том, что прозрачные озера характеризуются более благополучным экологическим состоянием.

Для общего фосфора также установлена значимая отрицательная корреляция с индексом Q ($\rho = -0,502$; $\tau = -0,34$; $p = 0,0029$), что указывает на снижение Q-индекса при росте концентрации фосфора (рис. 4).

Это подтверждает чувствительность индекса Q к уровню трофности: повышение содержания биогенных элементов (особенно фосфора, лимитирующего продукцию фитопланктона) ведет к изменению структуры сообществ в сторону эвтрофных видов и снижению индекса Q. Таким образом, индекс адекватно отражает степень трофического обогащения водоемов.

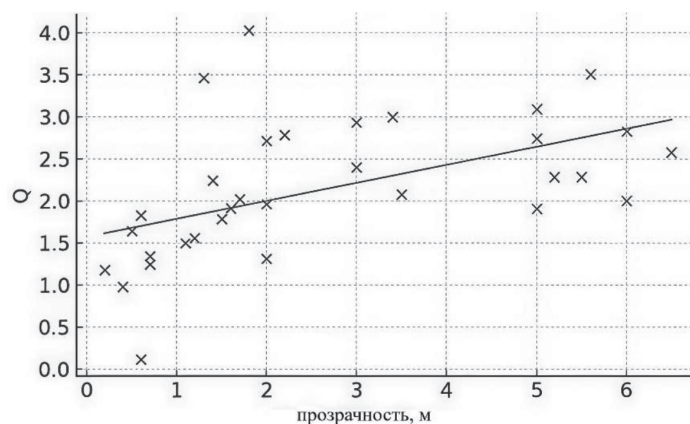


Рис. 3. Зависимость индекса Q от прозрачности воды

Fig. 3. Dependence of the Q index on water transparency

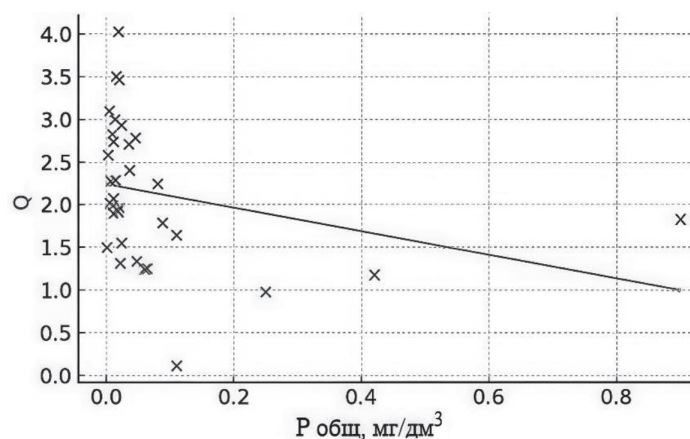


Рис. 4. Зависимость индекса Q от общего фосфора (P, мг/дм³)

Fig. 4. Dependence of the Q index on total phosphorus (P, mg/dm³)

Интересным результатом является отсутствие статистически значимой связи между индексом Q и относительной долей сине-зеленых водорослей (% в биомассе) ($\rho = -0,320$; $\tau = -0,216$; $p > 0,0799$). График «Индекс Q–доля сине-зеленых водорослей» (рис. 5) показал рассеянное распределение точек без явной зависимости.

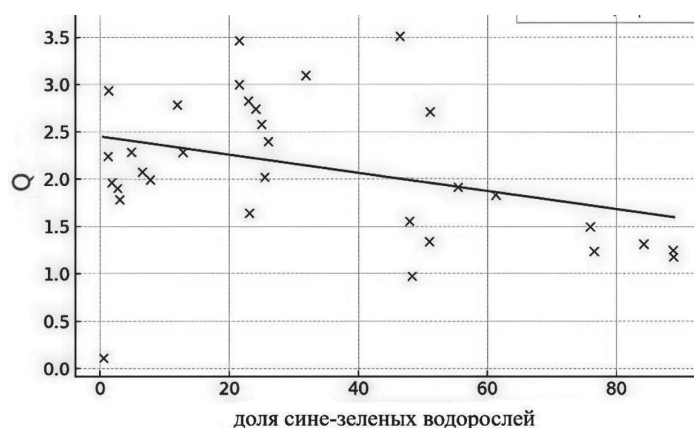


Рис. 5. Зависимость индекса Q от доли сине-зеленых водорослей

Fig. 5. Dependence of the Q index on the proportion of blue-green algae

На графике видно, что низкие значения индекса встречаются как при высокой доле сине-зеленых водорослей (например, в озерах Ильменок и Чертсвятское), так и при средней. В то же время озера с высоким Q-индексом (например, Горушка) могут содержать значительные, но не критические доли сине-зеленых водорослей. Это подтверждает, что сам по себе процент сине-зеленых водорослей в общей биомассе недостаточен для надежной оценки качества воды.

Исследование фитопланктонных сообществ в озерах Белорусского Поозерья показало выраженную сезонную изменчивость индекса Q, связанную со сменой доминирующих таксонов и функциональных групп, что согласуется с представлением о высокой чувствительности данного показателя к структурным изменениям сообществ и условиям среды [11, 12].

Средние сезонные значения Q-индекса изменялись от $1,97 \pm 0,4$ поздней весной до $2,4 \pm 1,1$ к раннему лету, а к осени снова незначительно понижались до $2,03 \pm 0,68$.

Такая сезонная изменчивость отражает закономерную смену функциональных групп фитопланктона под влиянием изменений температуры, освещенности, стратификации и содержания биогенных элементов, что неоднократно отмечалось и другими авторами [12, 13].

Колебания индекса наблюдались во всех изученных озерах.

Так, в ряде исследованных мезотрофных и мезотрофных с чертами олиготрофии озер (Вечелье, Обстерно, Кривое, Волос Северный и Волос Южный), некоторые из которых относятся к категории чистых водоемов и входят в состав природных заказников, качество вод по индексу Q варьировало от умеренного до хорошего. Такая неоднозначность интерпретации связана с особенностями расчета Q-индекса: значения могут снижаться не только под влиянием загрязнения или высокой трофности, но и за счет процентного вклада отдельных видов, не являющихся классическими индикаторами эвтрофирования. Даже при низких общих значениях биомассы доминирование одного или нескольких видов из функциональных групп с низкими весовыми коэффициентами способно существенно понижать итоговое значение индекса.

Так, в озерах Волос Северный, Волос Южный в поздневесенний период было зафиксировано значительное развитие таких видов, как *Dinobryon divergens*, *D. bavaricum*, *Synedra acus*, *Stephanodiscus* sp., которые традиционно не являются показателями биогенного загрязнения и не вызывают массовых цветений [10], однако относятся к функциональной группе, которая по методике расчета имеет низкий вклад в индекс Q, что приводит к уменьшению его итогового значения. Подобная закономерность отмечалась и в других исследованиях относительно ряда мезотрофных и чистых озер Турции и Европы. Согласно некоторым данным наблюдалось понижение Q-индекса в периоды массового развития *Dinobryon* spp. и других представителей функциональных групп, не связанных с эвтрофными условиями [14–16].

Гораздо сильнее варьировал индекс Q в эвтрофных озерах Потех, Горушка и Отолово. Его значения всегда увеличивались в раннелетний период, показывая хорошее качество воды, а затем снова значительно снижались к осени до показателей, соответствующих плохому или посредственному качеству.

Данная особенность эвтрофных водоемов была рассмотрена и другими исследователями, которые отмечают, что в определенный сезон в таких водоемах может наблюдаться снижение биогенного поступления (например, после сильных осадков, притоков разбавления, похолодания), что приводит к уменьшению продуктивности и смене видов на более мезотрофные. Тогда структура фитопланктона может стать более разнообразной, что приведет к повышению индекса Q [17].

Таким образом, водоем может быть трофически обогащенным (эвтрофным), но либо в конкретный сезон, либо после события разбавления, либо при изменении гидрологических условий на некоторое время видовая структура может переходить к состоянию выше по качеству (повышаются значения индекса Q).

Напротив, в гиперэвтрофных озерах Чертсвятское, Великое, Ильменок значения Q-индекса оставались стабильно низкими на протяжении всех сезонов, неизменно характеризуя качество воды как низкое. Это связано с тем, что в таких водоемах вне зависимости от сезона доминируют виды, относящиеся к функциональным группам, характерным для загрязненных и биогенно перенасыщенных условий (H_1 , S_1 , J). Эти группы формируются за счет массового развития устойчивых к эвтрофным условиям видов, таких как *Aphanizomenon flos-aquae*, *Limnithrix planctonica*, *Geitlerinema lemmermannii* и др. [2, 9].

Следовательно, было установлено, что только в гиперэвтрофных системах Q-индекс остается низким вне зависимости от сезона, тогда как в водоемах с более благоприятным трофическим статусом индекс Q чутко реагирует на сезонную смену функциональных групп.

Корреляционный анализ подтвердил значимые связи индекса Q с основными показателями трофности: отрицательные корреляции с биомассой фитопланктона ($\rho = -0,669$) и содержанием общего фосфора ($\rho = -0,50$) и положительную – с прозрачностью воды ($\rho = +0,682$). Эти зависимости соответствуют закономерностям, описанным ранее для различных регионов [1, 14, 16], и подтверждают, что Q-индекс может рассматриваться как интегральный индикатор трофического состояния, а не только как характеристика качества воды.

Однако полученные результаты также показывают, что индекс Q имеет ряд ограничений.

Во-первых, его значения существенно зависят от сезонной динамики сообществ и не всегда напрямую отражают кратковременные изменения состояния водоема. Например, при кратковременном снижении биогенных элементов или цветении ограниченного числа видов [12].

Во-вторых, массовое развитие отдельных таксонов, не только сине-зеленых водорослей, но и динофитовых (*Ceratium hirundinella* (O. F. Müller) Dujardin, 1841), эвгленовых (*Phacus*), диатомовых (*Stephanodiscus* sp., *Synedra acus*) и зеленых (*Scenedesmus quadricauda* (Turpin) Breb., 1835; *Elakatothrix genevensis* (Reverdin) Hindák 1962) также может приводить к снижению индекса Q, хотя эти виды не всегда являются прямыми индикаторами загрязнения [18]. Иногда значения биомассы вообще могут не коррелировать с индексом Q, особенно в низкоэвтрофных системах [19].

Такая картина указывает на то, что рост доли сине-зеленых водорослей может сопровождаться некоторым ухудшением структуры фитопланктона (снижение индекса Q), но их доля сама по себе не определяет значения Q-индекса. Вероятно, этот показатель более комплексно отражает структуру сообщества, учитывая вклад различных функциональных групп фитопланктона, а не только одну таксономическую группу.

Заключение. Индекс Q фитопланктонного сообщества в озерах Белорусского Поозерья варьировал в широких пределах (от 0,11 до 4,0). В течение вегетационного сезона наблюдалась отчетливая смена функциональных групп фитопланктона и соответствующая динамика индекса: его значения повышались от поздней весны к раннему лету и снижались к осени.

Максимальные средние значения зафиксированы в озерах Волос Северный, Волос Южный и Горушка, что соответствует качеству воды ближе к хорошему, тогда как минимальные (около 1,3–1,4) наблюдались в озерах Великое, Ильменок и Чертсвятское, что указывает на низкое качество водоемов.

Было установлено, что только в гиперэвтрофных системах индекс Q остается низким вне зависимости от сезона, тогда как в водоемах с более низким трофическим статусом индекс реагирует на сезонную смену функциональных групп фитопланктона и может варьироваться в значительной степени.

Статистический анализ подтвердил значимые зависимости индекса Q: он отрицательно коррелировал с биомассой фитопланктона ($\rho = -0,67$) и общим фосфором ($\rho = -0,50$), а положительно – с прозрачностью воды ($\rho = +0,68$). Это свидетельствует о том, что Q-индекс чувствительно реагирует на изменение трофического уровня и может использоваться не только для оценки качества воды, но и как показатель трофического состояния водоемов.

При этом доля сине-зеленых водорослей не показала достоверной корреляции с индексом Q, что подчеркивает комплексный характер индекса: массовое развитие сине-зеленых водорослей не всегда однозначно отражает степень эвтрофирования, тогда как Q-индекс интегрирует вклад всех функциональных групп и отражает общую сбалансированность фитопланктонного сообщества.

В целом результаты исследования подтверждают то, что индекс Q является информативным биоиндикатором, способным характеризовать комплексное состояние озер Белорусского Поозерья, включая их трофический статус, однако индекс имеет ряд ограничений, которые необходимо учитывать при оценке состояния водоема.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Список использованных источников

1. Корнева, Л. Г. Динамика морфофункциональных групп фитопланктона Рыбинского водохранилища и оценка качества его вод по индексу сообществ / Л. Г. Корнева, В. В. Соловьева // Водные ресурсы. – 2021. – Т. 48, № 1. – С. 52–60.
2. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton / C. S. Reynolds, V. Huszar, C. Kruk [et al.] // Journal of Plankton Research. – 2002. – Vol. 24, N 5. – P. 417–428. <https://doi.org/10.1093/plankt/24.5.417>
3. Семенченко, В. П. Экологическое качество поверхностных вод / В. П. Семенченко, В. И. Разлуцкий. – Мн.: Бел. наука, 2010. – 330 с.
4. Лопух, П. С. Общая лимнология: пособие для студентов геогр. фак. / П. С. Лопух, О. Ф. Якушко. – Мн.: БГУ, 2011. – 366 с.
5. Михеева, Т. М. Методы количественного учета нанофитопланктона (обзор) / Т. М. Михеева // Гидробиологический журнал. – 1989. – Т. 25, № 4. – С. 3–21.
6. Мордухай-Болтовский, Ф. Д. Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов / Ф. Д. Мордухай-Болтовский. – М.: Наука, 1975. – 240 с.
7. Определитель пресноводных водорослей СССР: в 14 т. / АН СССР, Ботан. ин-т им. В. Л. Комарова; отв. ред. М. М. Голлербах. – М.: Совет. наука; Л.: Наука, Ленингр. отд-ние, 1951–1983. – 14 т.
8. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Cyanoprokaryota. Oscillatoriales. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Cyanoprokaryota. Oscillatoriales / J. Komárek, K. Anagnostidis. – München: Elsevier Spektrum Akademischer Verlag, 2005. – 759 p.
9. Use of Phytoplankton Assemblages for Monitoring Ecological Status of Lakes within the Water Framework Directive: The Assemblage Index / J. Padisák, G. Borics, I. Grigorszky, É. Soróczki-Pintér // Hydrobiologia. – 2006. – Vol. 553. – P. 1–14. <https://doi.org/10.1007/s10750-005-1393-9>
10. Armstrong, G. D. Colonies as defence in the freshwater phytoplankton genus Dinobryon (Chrysophyceae): Ph. D. Thesis / G. D. Armstrong; The University of British Columbia. – Vancouver, 1985. – 178 p.
11. Short Communication: Assessing phytoplankton species structure in trophically different water bodies of South Ural, Russia / A. Kostryukova, I. Mashkova, S. Belov [et al.] // Biodiversitas Journal of Biological Diversity. – 2021. – Vol. 22, N 8. – P. 3530–3538. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d220853>
12. Кулицин, П. В. Опыт использования функциональной классификации фитопланктона для оценки качества воды некоторых левобережных притоков р. Волги (бассейн Чебоксарского водохранилища) / П. В. Кулицин, Е. Л. Воднева, А. Г. Охапкин // Принципы экологии. – 2020. – Т. 9, № 2. – С. 48–59.
13. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters / U. Sommer, Z. M. Gliwicz, W. Lampert, A. Duncan // Archiv für Hydrobiologie. – 1986. – Vol. 106, N 4. – P. 433–471. <https://doi.org/10.1127/archiv-hydrobiol/106/1986/433>
14. Demir, A. N. Phytoplankton functional groups provide a quality assessment method by the Q assemblage index in Lake Mogan (Turkey) / A. N. Demir, O. Fakioglu, B. Dural // Turkish Journal of Botany. – 2014. – Vol. 38, N 1. – P. 169–179. <https://doi.org/10.3906/bot-1301-60>
15. Phytoplankton dynamics and structure, and ecological status estimation by the Q assemblage index: a comparative analysis in two shallow Mediterranean lakes / T. O. Sevindik, H. Tunca, A. Gönülol [et al.] // Turkish Journal of Botany. – 2017. – Vol. 41, N 1. – P. 25–36. <https://doi.org/10.3906/bot-1510-22>
16. Ochocka, A. Sensitivity of plankton indices to lake trophic conditions / A. Ochocka, A. Pasztaleniec // Environmental Monitoring and Assessment. – 2016. – Vol. 188. – Art. 622. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5634-3>
17. Phytoplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Nanhai Lake / D. Gong, Z. Guo, W. Wei [et al.] // Diversity. – 2022. – Vol. 14, N 11. – Art. 927. <https://doi.org/10.3390/d14110927>

18. Трифонова, И. С. Экология и сукцессия озерного фитопланктона / И. С. Трифонова. – Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1990. – 182 с.
19. Функциональная классификация фитопланктона и микробиологические параметры для оценки состояния прибрежных вод Южного Байкала / Д. В. Малашенков, И. В. Мошарова, В. В. Ильинский, С. А. Мошаров // Биология внутренних вод. – 2022. – № 1. – С. 3–13.

References

1. Korneva L. G., Solov'eva V. V. Dynamics of morphofunctional groups of phytoplankton of the Rybinsk Reservoir and assessment of the quality of its waters using the community index. *Vodnye resursy* [Water resources], 2021, vol. 48, no. 1, pp. 52–60 (in Russian).
2. Reynolds C. S., Huszar V., Kruk C., Naselli-Flores L., Melo S. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 2002, vol. 24, no. 5, pp. 417–428. <https://doi.org/10.1093/plankt/24.5.417>
3. Semenchenko V. P., Razlutskiy V. I. *Ecological quality of surface waters*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2010. 330 p. (in Russian).
4. Lopukh P. S., Yakushko O. F. *General limnology: a manual for students of the Faculty of Geography*. Minsk, Belarussian State University, 2011. 366 p. (in Russian).
5. Mikheeva T. M. Methods of quantitative enumeration of nanophytoplankton (review). *Gidrobiologicheskii zhurnal* [Hydrobiological Journal], 1989, vol. 25, no. 4, pp. 3–21 (in Russian).
6. Mordukhai-Boltovskii F. D. *Methodology for studying biogeocenoses of inland water bodies*. Moscow, Nauka Publ., 1975. 240 p. (in Russian).
7. Gollerbakh M. M. (ed.). Identifier of freshwater algae of the USSR. 14 vol. Moskva, Sovetskaya nauka Publ., Leningrad, Nauka, Leningradskoe otделение Publ., 1951–1983 (in Russian).
8. Komárek J., Anagnostidis K. *Süßwasserflora von Mitteleuropa. Cyanoprokaryota. Oscillatoriales*. München, Elsevier Spektrum Akademischer Verlag, 2005. 759 p.
9. Padisak J., Borics G., Grigorszky I., Soroczki-Pinter E. Use of Phytoplankton Assemblages for Monitoring Ecological Status of Lakes within the Water Framework Directive: The Assemblage Index. *Hydrobiologia*, 2006, vol. 553, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1007/s10750-005-1393-9>
10. Armstrong G. D. *Colonies as defence in the freshwater phytoplankton genus Dinobryon (Chrysophyceae)*. Ph. D. Thesis. Vancouver, 1985. 178 p.
11. Kostryukova A., Mashkova I., Belov S., Shchelkanova E., Trofimenko V. Short Communication: Assessing phytoplankton species structure in trophically different water bodies of South Ural, Russia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 2021, vol. 22, no. 8, pp. 3530–3538. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d220853>
12. Kulizin P. V., Vodeneeva E. L., Okhapkin A. G. Experience of using functional classification of phytoplankton to assess the water quality of some left-bank tributaries of the Volga River (Cheboksary Reservoir basin). *Printsiipy ekologii* [Principles of Ecology], 2020, vol. 9, no. 2, pp. 48–59 (in Russian).
13. Sommer U., Gliwicz, Z. M., Lampert W., Duncan A. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters. *Archiv für Hydrobiologie*, 1986, vol. 106, no. 4, pp. 433–471. <https://doi.org/10.1127/archiv-hydrobiol/106/1986/433>
14. Demir A. N., Fakioglu O., Dural, B. Phytoplankton functional groups provide a quality assessment method by the Q assemblage index in Lake Mogan (Turkey). *Turkish Journal of Botany*, 2014, vol. 38, no. 1, pp. 169–179. <https://doi.org/10.3906/bot-1301-60>
15. Sevidik T. O., Tunca H., Gönülol A., Gürsoy N., Küçükaya Ş. N. Phytoplankton dynamics and structure, and ecological status estimation by the Q assemblage index: a comparative analysis in two shallow Mediterranean lakes. *Turkish Journal of Botany*, 2017, vol. 41, no. 1, pp. 25–36. <https://doi.org/10.3906/bot-1510-22>
16. Ochocka A., Pasztaleniec A. Sensitivity of plankton indices to lake trophic conditions. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, vol. 188, art. 622. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5634-3>
17. Gong D., Guo Z., Wei W., Bi J., Wang Zh., Ji X. Phytoplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Nanhai Lake. *Diversity*, 2022, vol. 14, no. 11, art. 927. <https://doi.org/10.3390/d14110927>
18. Trifonova I. S. *Ecology and succession of lake phytoplankton*. Leningrad, Nauka. Leningradskoe otделение Publ., 1990. 182 p. (in Russian).
19. Malashenkov D. V., Mosharova I. V., Il'inskiy V. V., Mosharov S. A. Functional classification of phytoplankton and microbiological parameters for assessing the state of coastal waters of Southern Baikal. *Biologiya vnutrennikh vod* [Biology of inland waters], 2022, no. 1, pp. 3–13.

Информация об авторе

Карпаева Анастасия Юрьевна – мл. науч. сотрудник. Научно-практический центр НАН Беларуси по биоресурсам (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: karpaevanastya1@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0008-9240-7647>

Information about the author

Anastasiya Yu. Karpaeva – Junior Researcher. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: karpaevanastya1@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0008-9240-7647>