

УДК 574.5

## ОЦЕНКА ДИНАМИКИ РАЗНООБРАЗИЯ РЫБНОГО НАСЕЛЕНИЯ ПСКОВСКОГО ОЗЕРА

Г. Т. Фрумин<sup>1\*</sup>, С. Г. Михалап<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена (наб. р. Мойки, 48, Санкт-Петербург, Россия, 191186), gfrumin@mail.ru

<sup>2</sup> Псковский филиал ФГБНУ «ПсковНИРО» (ул. Максима Горького, 13, Псков, Россия, 180007)

Статья связана с актуальной проблемой сокращения биологического разнообразия и подходами к его оценке на примере рыбного населения Псковского озера. Материалом для анализа изменений структуры рыбной части озерного сообщества послужила рыбопромысловая статистика за период 1960–2023 гг. Для математико-статистического анализа массив первичных данных промышленного вылова рыб был разделен на пятилетние периоды. Структура уловов при многолетних рядах наблюдений, несмотря на селективность промысла, достаточно адекватно отражает динамику рыбного населения и изменение его видового разнообразия, представленного составом уловов и соотношением биомасс разных видов рыб. Однако достоверность оценки тенденции снижения разнообразия остается неоднозначным вопросом при применении разных индексов биоразнообразия. Поэтому целью данной работы являлся сравнительный анализ информативности разных индексов биоразнообразия для оценки динамики видового разнообразия рыбного населения Псковского озера. Использовались шесть следующих индексов: индекс Шеннона (H), индекс Пиелу (E), индекс Шелдона (SH), индекс Животовского ( $\mu$ ), индекс Симпсона – индекс доминирования (C) и индекс разнообразия (D). Приведена матрица парных корреляций индексов биоразнообразия, примененных для оценки динамики разнообразия видовой структуры рыбного населения Псковского озера. Установлена наибольшая информативность индексов Симпсона – доминирования и разнообразия (C и D). С 1960 по 2023 г. величина индекса биоразнообразия Симпсона увеличилась от 3,70 до 5,88 и характеризуется высоким положительным трендом (по шкале Чеддока коэффициент корреляции  $r = 0,85$ ). Кроме того, применение индекса биоразнообразия Симпсона позволило выявить влияние абиотических факторов на динамику разнообразия рыбного населения Псковского озера. Для периода 2000–2023 гг. построены следующие математические модели: индекс биоразнообразия Симпсона – уровень озера, температура воды, концентрация фосфора валового, биохимическое потребление кислорода в течение пяти суток, химическое потребление кислорода. Выявлена адекватная зависимость между индексом биоразнообразия Симпсона и концентрациями фосфора валового в воде озера, что отражает негативное влияние процесса эвтрофирования на рыбное население Псковского озера.

Ключевые слова: Псковское озеро; рыбное население; динамика видового разнообразия; индексы биоразнообразия; математические модели; абиотические факторы

Для цитирования. Фрумин Г. Т., Михалап С. Г. Оценка динамики разнообразия рыбного населения Псковского озера // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 2. С. 91–100. doi: 10.17076/lim2058

## G. T. Frumin<sup>1\*</sup>, S. G. Mikhalap<sup>2</sup>. ASSESSMENT OF CHANGES IN THE DIVERSITY OF THE FISH POPULATION OF LAKE PSKOV

<sup>1</sup> Herzen State Pedagogical University of Russia (48 Moika River Emb., 191186 St. Petersburg, Russia), gfrumin@mail.ru

<sup>2</sup> Pskov Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, PskovNIRO (13 Maksima Gorkogo St., 180007 Pskov, Russia)

The article addresses the topical problem of the loss of biological diversity and approaches its assessment through the case of the fish population of Lake Pskov. The input for the analysis of changes in the structure of the fish component of the lake community was fishery statistics for the period 1960–2023. For mathematical and statistical analysis, the primary dataset on industrial fish catches was divided into five-year periods. Despite the selectivity of fisheries, the structure of catches in the long-term observation series quite adequately reflects the dynamics of the fish population and changes in its species diversity, represented by the composition of catches and the biomass ratios of different fish species. However, the reliability of the assessments of the diversity decline trend by different biodiversity indices is equivocal. Therefore, the aim of this work was to compare how meaningful the different biodiversity indices are in assessing the species diversity dynamics in the fish population of Lake Pskov. The following six indices were used: Shannon index (H), Pielou index (E), Sheldon index (SH), Zhivotovsky index ( $\mu$ ), Simpson's dominance index (C), Simpson's diversity index (D). The matrix of paired correlations of the biodiversity indices used to assess changes in the diversity of the species structure of the Lake Pskov fish population is presented. Simpson's dominance and diversity indices (C and D) proved to be the most meaningful. From 1960 to 2023, the Simpson's diversity index (D) increased from  $D = 3.70$  to  $5.88$ , showing a "high" positive trend (on the Chaddock scale, correlation coefficient  $r = 0.85$ ). In addition, application of the Simpson's diversity index revealed the effect of abiotic factors on the dynamics of the fish population diversity in Lake Pskov. For the period 2000–2023, the following mathematical models were built: Simpson's diversity index – water level, water temperature, total phosphorus concentration, biochemical oxygen demand for five days, chemical oxygen demand. An adequate relationship was found between the Simpson's diversity index (D) and total phosphorus concentrations in the lake water, which reflects the negative impact of the eutrophication process on the fish population of Lake Pskov.

**Keywords:** Lake Pskov; fish population; dynamics of species diversity; biodiversity indices; mathematical models; abiotic factors

**For citation:** Frumin G. T., Mikhalap S. G. Assessment of changes in the diversity of the fish population of Lake Pskov. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 2. P. 91–100. doi: 10.17076/lim2058

### Введение

Актуальность проблемы сохранения и оценки биоразнообразия рассмотрена во множестве публикаций [Мэгарран, 1992; Решетников, 2000; Бобылев и др., 2002; Протасов, 2002; Примак, 2002; Шитиков, Розенберг, 2005; Бродский, 2016; Болотова, 2017; Захаров, Трофимов, 2019; Шайхутдинова, 2019; Фрумин, 2022]. Прогрессирующее снижение биоразнообразия водных экосистем в значительной мере определяется их многоплановой эксплуатацией и тесной зависимостью от

трансформированных водосборов. Наглядным индикатором этого негативного процесса является рыбное население, которое как верхний трофический уровень интегрирует в себе происходящие перестройки на низших трофических уровнях водного сообщества.

Сдвиги в структуре рыбного населения озер происходят под влиянием изменения условий обитания и воспроизводства на фоне наблюдаемых в экосистемах процессов эвтрофирования, органического и токсического загрязнения, потепления климата, а также биоинвазий [Решетников и др., 1982; Терещенко, Стрельни-

ков, 1995; Болотова, 1997; Терещенко, 2002б; Терещенко и др., 2004]. Выявление трендов изменения структуры рыбного населения необходимо для прогноза устойчивости экосистем, зависящей от поддержания биоразнообразия, что требует адекватной оценки. В исследованиях динамики разнообразия рыбной части сообщества опробовано применение индекса биоразнообразия Шеннона для анализа многолетних рядов наблюдений рыбопромысловой статистики [Терещенко и др., 1994, 2004; Терещенко, Стрельников, 1995; Терещенко, 2002а; Болотова и др., 2016].

К настоящему времени предложено более 40 индексов, предназначенных для оценки биоразнообразия [Малько, 2020]. Отмечается, что «трудности в применении показателей разнообразия и оценке их качества заключаются в сложном и комплексном характере самой интерпретируемой величины, а также в отсутствии какой-либо объективной шкалы отсчета разнообразия, независимой от концепции, принятой исследователем на основе его субъективных (точнее, интуитивных) представлений» [Шитиков, Розенберг, 2005]. Поэтому неоднозначным вопросом остается достоверность оценки тенденции снижения разнообразия рыбной части сообщества при применении разных индексов биоразнообразия.

Исходя из вышеизложенного, целью данной работы является сравнительный анализ информативности разных индексов биоразнообразия для оценки динамики видового разнообразия рыбного населения Псковского озера.

## Материалы и методы

Псковское озеро – крупный пресноводный водоем, который является южной составляющей Чудско-Псковского озера. Делится на три основные части: Чудское озеро с площадью акватории 2611 км<sup>2</sup>, Псковское озеро – 708 км<sup>2</sup> и соединяющее их Теплое озеро – 236 км<sup>2</sup> [Кондратьев и др., 2014] (рис. 1). Площадь Псковского озера 709 км<sup>2</sup>, объем воды 2,68 км<sup>3</sup>, наибольшая глубина 5,3 м, средняя глубина 3,8 м, высота над уровнем моря 30 м [Псковско-Чудское..., 2012].

Уязвимость озера к антропогенному воздействию обусловлена его мелководностью. Ухудшение условий обитания и воспроизводства рыб связано с хроническим загрязнением и эвтрофированием, что вызывает перестройку структуры рыбного населения в сторону доминирования более толерантных видов, упрощение сообщества и снижение его разнообразия. Псковское озеро относится к крупным рыбопромысловым водоемам, и селективность про-

мысла вносит свой негативный вклад в изменение видового разнообразия рыбной части сообщества [Данилов, 2023].

Использованная в расчетах информация по динамике и составу уловов основана на материалах публикаций и архивных источников из фондов Псковского отделения ГосНИОРХ (Псковский филиал ФГБНУ «ВНИРО»).

Анализировался состав рыбодобычи, в котором представлены данные по вылову восьми основных промысловых видов рыб: снеток, судак, лещ, щука, налим, окунь, плотва, ерш, а также показатели уловов рыб в категории «прочие».

Для математико-статистического анализа изменения состава уловов рыб массив первичных данных рыбопромысловой статистики с 1960 по 2023 г. был разделен на пятилетние периоды (табл. 1).

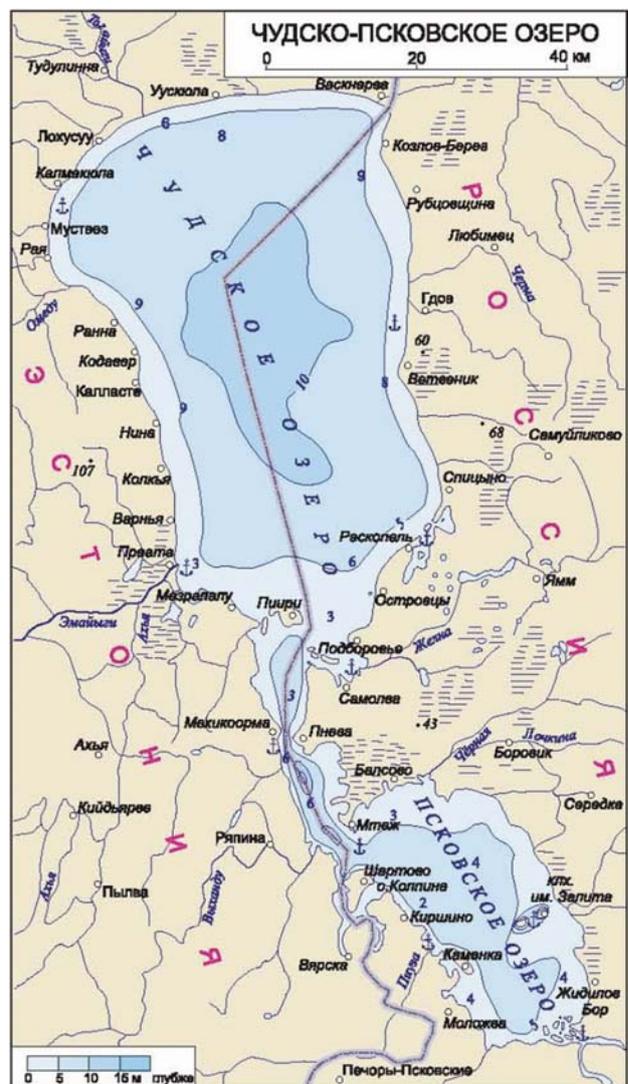


Рис. 1. Схема Чудско-Псковского озера [Кондратьев и др., 2014]

Fig. 1. Scheme of Lake Peipus [Kondrat'ev et al., 2014]

Для количественной оценки изменения разнообразия рыбного населения Псковского озера по каждому 5-летнему периоду показателей рыбодобычи использованы шесть следующих индексов биоразнообразия: индекс Шеннона (H), индекс Пиелу (E), индекс Шелдона (SH), индекс Животовского ( $\mu$ ), индекс Симпсона:

индекс доминирования (C) и индекс разнообразия (D) [Песенко, 1982; Методы..., 2019] (табл. 2).

Расчет вышеприведенных индексов биоразнообразия (табл. 2) базируется на предварительной оценке величин доли вылова каждого вида рыб –  $p_i$  (табл. 3).

Таблица 1. Периодизация статистики рыбодобычи в Псковском озере

Table 1. Periodization of fishing statistics in Lake Pskov

Период Period	Годы Years	Период Period	Годы Years	Период Period	Годы Years
1	1960–1964	6	1985–1989	11	2010–2014
2	1965–1969	7	1990–1994	12	2015–2019
3	1970–1974	8	1995–1999	13	2020–2023
4	1975–1979	9	2000–2004	-	-
5	1980–1984	10	2005–2009	-	-

Таблица 2. Индексы биоразнообразия, использованные для оценки разнообразия рыбного населения Псковского озера

Table 2. Biodiversity indices used to assess the diversity of fish population in Lake Pskov

Индекс Index	Формула Formula
Шеннона (H) Shannon (H)	$H = -\sum p_i \log_2 p_i$ , $p_i$ – доля вида/share of species
Шелдона (SH) Sheldon (SH)	$SH = \exp(H)$
Животовского ( $\mu$ ) Zhitovovsky ( $\mu$ )	$\mu = [\sum \sqrt{p_i}]^2$
Пиелу (E) Pielou (E)	$E = H / \log_2 S$ , S – число видов/number of species
Симпсона (доминирования) (C) Simpson (dominance) (C)	$C = \sum p_i^2$
Симпсона (разнообразия) (D) Simpson (diversity) (D)	$D = 1/C$

Таблица 3. Соотношение биомассы разных видов рыб в уловах Псковского озера за 5-летние периоды с 1960 по 2023 г.

Table 3. Ratio of biomass of different fish species in catches of Lake Pskov for 5-year periods from 1960 to 2023

Период Period	Снеток Smelt	Судак Zander	Лещ Bream	Щука Pike	Налим Burbot	Окунь Perch	Плотва Roach	Ерш Ruff	Прочие Other
1	0,2821	0,0034	0,0365	0,0491	0,0224	0,0827	0,1036	0,4158	0,0045
2	0,5241	0,0015	0,0171	0,0279	0,0167	0,0679	0,0794	0,2604	0,0050
3	0,1580	0,0029	0,0079	0,0314	0,0123	0,1624	0,1285	0,4965	0,0001
4	0,2119	0,0409	0,0225	0,0361	0,0161	0,0902	0,1343	0,4846	0,0000
5	0,4662	0,0090	0,0419	0,0523	0,0180	0,0970	0,0728	0,2427	0,0000
6	0,1895	0,0497	0,0634	0,0634	0,0125	0,0615	0,0783	0,4805	0,0011
7	0,1517	0,2183	0,1140	0,0788	0,0151	0,0384	0,1490	0,2325	0,0021
8	0,0144	0,1753	0,2113	0,0700	0,0047	0,0602	0,3135	0,1427	0,0079
9	0,0010	0,1036	0,2325	0,0624	0,0020	0,0494	0,2552	0,2700	0,0239
10	0,0142	0,1100	0,2129	0,0455	0,0049	0,0438	0,2824	0,2555	0,0307
11	0,0008	0,0993	0,2676	0,0700	0,0075	0,0877	0,2116	0,2162	0,0393
12	0,0029	0,1615	0,2399	0,0645	0,0111	0,1530	0,2382	0,1265	0,0176
13	0,0000	0,2100	0,1594	0,1226	0,0016	0,2011	0,1918	0,1061	0,0076

Примечание. Цифрами с 1 по 13 обозначены 5-летние периоды в статистике рыбодобычи (табл. 1).

Note. Numbers 1 to 13 indicate 5-year periods in fishing statistics (Table 1).

## Результаты и обсуждение

Для сравнительного анализа динамики видового разнообразия рыбного населения Псковского озера были проведены расчеты с использованием шести индексов, применяемых в оценке биоразнообразия сообществ экосистем (табл. 4).

Для выбора наиболее информативного индекса биоразнообразия, отражающего тренд изменения видового разнообразия рыбного населения Псковского озера, были построены регрессионные уравнения между индексами и периодами рыбодобычи, а также определены их статистические характеристики (табл. 5).

Следует подчеркнуть, что наиболее пригодное статистически значимое уравнение должно иметь наибольшее значение  $F$ , наибольший коэффициент корреляции  $r$  и наименьшую стандартную ошибку  $\sigma$ . Статистически значимое уравнение может быть использовано для прогнозирования лишь в том случае, если величина его  $F$ -критерия будет не менее чем в 4 раза превосходить табличное значение для уровня значимости 95 % [Дрейпер, Смит, 1986].

Сформулированным условиям соответствуют индексы Симпсона – доминирования и разнообразия ( $C$  и  $D$ ). Диапазон индекса  $C$  изменяется от 0 до 1. Чем ближе значение  $C$  к 1, тем ниже разнообразие. Чем ближе значение  $C$  к 0,

Таблица 4. Показатели изменения разнообразия рыбного населения Псковского озера, рассчитанные по разным индексам биоразнообразия

Table 4. Indicators of change in the diversity of the fish population of Lake Pskov, calculated using different biodiversity indices

Годы Years	Индексы разнообразия Diversity indices					
	H	E	C	D	$\mu$	SH
1960–1964	2,25	0,71	0,27	3,70	7,82	9,49
1965–1969	1,94	0,61	0,35	2,86	5,35	6,96
1970–1974	2,04	0,64	0,32	3,13	5,31	7,69
1975–1979	2,11	0,67	0,31	3,23	6,21	8,25
1980–1984	2,19	0,69	0,30	3,33	5,85	8,94
1985–1989	2,31	0,73	0,29	3,45	6,39	10,07
1990–1994	2,73	0,86	0,17	7,33	7,33	15,33
1995–1999	2,53	0,80	0,20	5,00	6,78	12,55
2000–2004	2,02	0,64	0,21	4,76	6,41	7,54
2005–2009	2,52	0,80	0,21	4,76	6,85	12,43
2010–2014	2,61	0,82	0,19	5,26	6,92	13,60
2015–2019	2,64	0,83	0,18	5,56	7,14	14,01
2020–2023	2,60	0,87	0,17	5,88	6,49	13,46

Таблица 5. Регрессионные уравнения и статистические характеристики индексов биоразнообразия, отражающие изменения разнообразия рыбного населения Псковского озера

Table 5. Regression equations and statistical characteristics of biodiversity indices reflecting changes in the diversity of the fish population of Lake Pskov

Регрессионные уравнения Regression equations	Статистические показатели Statistical characteristics				
	n	$\sigma$	r	$F_p$	$F_p/F_T$
$H = 2,00 + 0,049 \cdot \text{период}/\text{period}$	13	0,20	0,71	11,0	2,3
$E = 0,62 + 0,017 \cdot \text{период}/\text{period}$	13	0,06	0,74	13,6	2,9
$C = 0,34 - 0,014 \cdot \text{период}/\text{period}$	13	0,04	0,85	27,7	5,8
$D = 2,67 + 0,24 \cdot \text{период}/\text{period}$	13	0,62	0,85	27,5	5,8
$\mu = 5,41 + 0,13 \cdot \text{период}/\text{period}$	12	0,46	0,75	9,3	1,9
$SH = 7,14 + 0,52 \cdot \text{период}/\text{period}$	13	2,11	0,71	11,1	2,3

Примечание. n – число наблюдений, r – коэффициент корреляции,  $\sigma$  – стандартная ошибка,  $F_p$  – расчетное значение критерия Фишера,  $F_T$  – табличное значение критерия Фишера при уровне значимости 95 %.

Note. n – number of observations, r – correlation coefficient,  $\sigma$  – standard error,  $F_p$  – calculated value of Fisher's test,  $F_T$  – tabulated value of Fisher's test at a significance level of 95 %.

тем больше разнообразие среды обитания. Соответственно, чем больше величина D, тем больше биоразнообразие.

Мера доминирования Симпсона позволяет оценить, насколько равномерно распределены доли отдельных видов в сообществе. Высокие значения параметра указывают на дисбаланс в пользу численности небольшого количества видов. Мера доминирования принимает большие значения в экосистемах с ярко выраженными доминантами (то есть при наличии видов с большим количеством особей).

Рассчитанные для многолетнего периода (1960–1923 гг.) значения индексов Симпсона (D) отражают тренд увеличения доминирования по доле разных видов рыб в общей биомассе и отклонение от устойчивого состояния структуры рыбного населения Псковского озера (рис. 2).

Парные корреляции индексов биоразнообразия рыбного населения в Псковском озере представлены в табл. 6.

Согласно шкале Чеддока соотношение между индексом Шеннона (H) и индексом Пиелу (E) и между индексом Шеннона (H) и индексом Шелдона (SH) характеризуется как «весьма высокое», а между другими индексами – как «высокое» [Макарова, Трофимец, 2002]. Оценка парной корреляции между индексами разнообразия позволяет выбрать наиболее репрезентативные из них.

Информативность индекса биоразнообразия Симпсона связана с возможностью оценки зависимости разнообразия рыбного населения от абиотических факторов.

Выявлены количественные соотношения между индексом биоразнообразия Симпсона

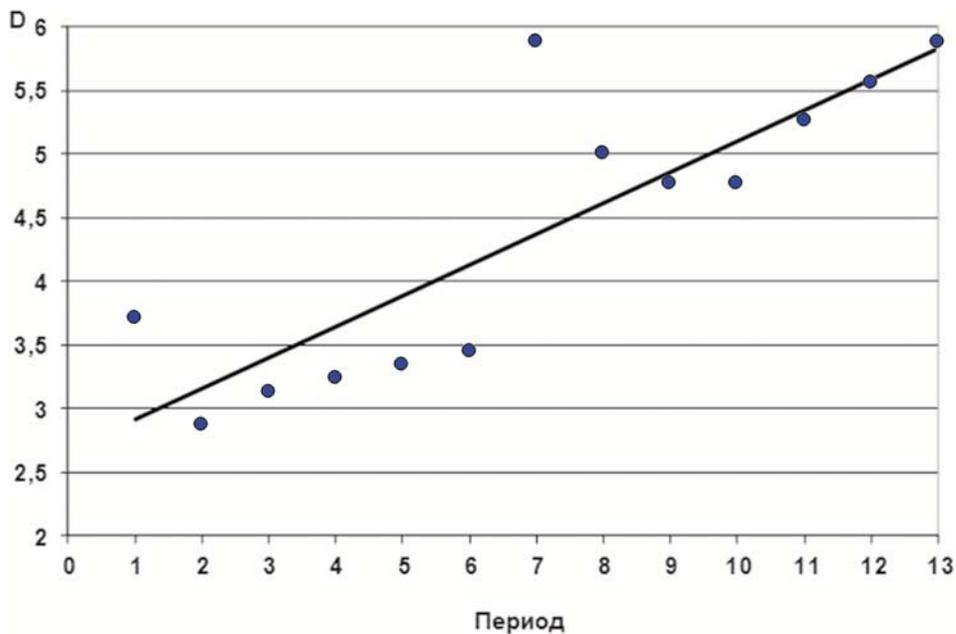


Рис. 2. Динамика индекса биоразнообразия Симпсона (D) рыбного населения Псковского озера

Fig. 2. Dynamics of the Simpson (D) biodiversity index of the fish population of Lake Pskov

Таблица 6. Матрица парных корреляций индексов биоразнообразия промысловых рыб в Псковском озере  
Table 6. Matrix of paired correlations of biodiversity indices of commercial fish in Lake Pskov

Индекс Index	H	E	C	D	μ	SH
H	1	0,99	0,85	0,86	0,87	0,99
E	0,99	1	0,86	0,87	0,84	0,98
C	0,85	0,86	1	0,98	0,88	0,85
D	0,86	0,87	0,98	1	0,85	0,88
μ	0,87	0,84	0,88	0,85	1	0,87
SH	0,99	0,98	0,85	0,88	0,87	1

(D) и гидрофизическими (уровень озера, среднегодовая температура воды озера) и гидрохимическими (БПК<sub>5</sub>, ХПК, содержание фосфора валового) факторами обитания рыб в Псковском озере (табл. 7).

При сопоставлении индекса Симпсона (D), отражающего биоразнообразие рыбного населения Псковского озера, и среднегодовых концентраций фосфора валового (P<sub>ВАЛ</sub>), характеризующих уровень трофического статуса озера (рис. 3), установлена отрицательная корреляция с высокой теснотой связи ( $r = 0,857 > 0,7$ ). Это свидетельствует об обратной зависимости между показателями трофического статуса и биоразнообразия.

Линия регрессии, приведенная на рис. 3, описывается следующей формулой:

$$D = 10,26 - 0,057P_{\text{ВАЛ}}$$

$$n = 5; r = 0,925; r^2 = 0,857; s = 0,216;$$

$$Fp = 17,9; FP/FT = 2,3.$$

Известно, что изменения в рыбном населении водоемов под влиянием эвтрофирования проявляются в следующих процессах. Происходит снижение численности и затем исчезновение наиболее требовательных к качеству условий обитания видов рыб. Отмечается изменение рыбопродуктивности водоема или отдельных его зон, что определяет его переход по рыбохозяйственному значению в другую категорию.

Таблица 7. Динамика гидрофизических и гидрохимических характеристик Псковского озера в 2000–2023 гг.  
Table 7. Dynamics of the hydrophysical and hydrochemical characteristics of Lake Pskov

Годы Years	Уровень, см Level, cm	Температура воды, °С Water temperature, °C	БПК <sub>5</sub> , мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup> BOD <sub>5</sub> , mgO <sub>2</sub> /dm <sup>3</sup>	ХПК, мгО/дм <sup>3</sup> COD, mgO/ dm <sup>3</sup>	Фосфор валовый, P <sub>ВАЛ</sub> мкг/дм <sup>3</sup> Total phosphorus, P <sub>tot</sub> µg/dm <sup>3</sup>
2000–2004	181	12,9	4,3	47,8	98,0
2005–2009	191	11,4	2,0	43,5	92,4
2010–2014	201	12,8	2,3	39,5	84,0
2015–2019	181	11,5	2,8	44,7	85,8
2020–2023	182	12,1	2,4	49,0	77,3

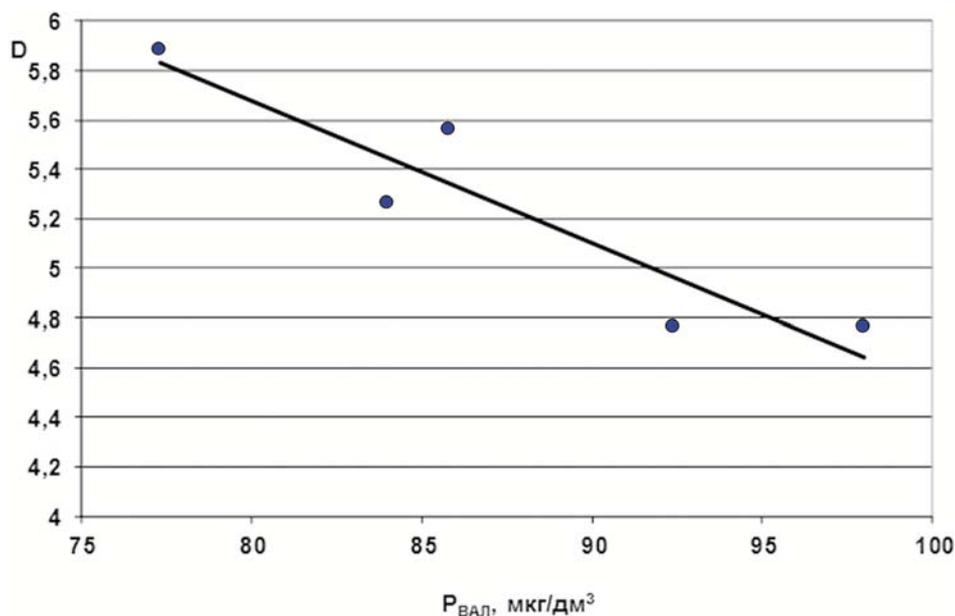


Рис. 3. Зависимость индекса биоразнообразия Симпсона (D), отражающего разнообразие рыбного населения, от концентраций фосфора валового в Псковском озере

Fig. 3. Dependence of the Simpson biodiversity index (D), reflecting the diversity of fish population, on the concentrations of total phosphorus in Lake Pskov

## Заключение

Впервые для Псковского озера проведена оценка динамики разнообразия рыбного населения по многолетним рядам рыбопромысловой статистики более чем за 60-летний период. Для количественной оценки биоразнообразия использованы шесть следующих индексов: индекс Шеннона (H), индекс Пиелу (E), индекс Шелдона (SH), индекс Животовского ( $\mu$ ), индекс Симпсона – индекс доминирования (C) и индекс разнообразия (D). Установлено, что наиболее информативными индексами для оценки биоразнообразия в Псковском озере являются индексы Симпсона – доминирования и разнообразия (C и D). Установлено статистически значимое соотношение между индексом биоразнообразия Симпсона (D) и среднегодовыми концентрациями фосфора валового в воде озера, характеризующими его трофический статус.

## Литература

- Бобылев С. Н., Медведева О. Е., Соловьева С. Н.* Экономика сохранения биоразнообразия: Справочник / Проект ГЭФ «Сохранение биоразнообразия Российской Федерации»; Институт экономики природопользования. М., 2002. 604 с.
- Болотова Н. Л.* Проблемы сохранения исчезающих популяций рыб в водоемах Вологодской области // Мониторинг биоразнообразия. М.: Наука, 1997. С. 36–45.
- Болотова Н. Л.* Биологическое разнообразие и проблемы его сохранения // Наука – школе: Сб. науч. статей. Вып. VI. СПб.: Арт-Экспресс, 2017. С. 119–174.
- Болотова Н. Л., Степанов М. В., Фрумин Г. Т., Болотов О. В.* Динамика разнообразия рыбного населения крупных озер Вологодской области // Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды: Мат-лы V Междунар. науч. конф. (Минск – Нарочь, 12–17 сентября 2016 года) / Белорусский гос. ун-т. Минск-Нарочь, 2016. С. 283–284.
- Бродский А. К.* Биоразнообразие: структура, проблемы и перспективы сохранения // Аспекты биоразнообразия: Сб. трудов Зоологического музея МГУ им. М. В. Ломоносова. Т. 54(1). М.: Т-во науч. изд. КМК, 2016. С. 380–396.
- Городничев Р. М. и др.* Методы экологических исследований. Основы статистической обработки данных: учебно-методическое пособие / Мин-во науки и высшего образования РФ, СВФУ имени М. К. Аммосова, Институт естественных наук, Эколого-географическое отделение. Якутск: Изд. дом СВФУ, 2019. 93 с.
- Данилов М. Б.* Динамика популяций основных промысловых рыб Псковско-Чудского озера: Дис. ... канд. биол. наук. М., 2023. 146 с.
- Дрейпер Н., Смит Г.* Прикладной регрессионный анализ. М.: Финансы и статистика, 1986. 366 с.
- Захаров В. М., Трофимов И. Е.* Оценка состояния биоразнообразия: исследование стабильности развития. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2019. 160 с.
- Кондратьев С. А., Мельник М. М., Шмакова М. В., Уличев В. И.* Диффузная биогенная нагрузка на Чудско-Псковское озеро с российской водосборной территории в современных условиях // Общество. Среда. Развитие. 2014. № 3(32). С. 163–169.
- Макарова Н. В., Трофимец В. Я.* Статистика в Excel. М.: Финансы и статистика, 2002. 368 с.
- Малько С. В.* Биоразнообразие. Конспект лекций / Керченский гос. морской технологический ун-т. Керчь, 2020. 41 с.
- Мэгарран Э.* Экологическое разнообразие и его измерение. М.: Мир, 1992. 181 с.
- Песенко Ю. А.* Принципы и методы количественного анализа в фаунистических исследованиях. М.: Наука, 1982. 288 с.
- Примак Р.* Основы сохранения биоразнообразия / Пер. с англ. О. С. Якименко, О. А. Зиновьевой. М.: Изд-во НУМЦ, 2002. 256 с.
- Протасов А. А.* Биоразнообразие и его оценка. Концептуальная диверсикология. Киев, 2002. 105 с.
- Псковско-Чудское озеро* / Науч. ред. Т. Тимм, А. Раукас, Ю. Хаберман, А. Яани. Тарту: Eesti Loodusfoto, 2012. 495 с.
- Решетников Ю. С., Попова О. А., Стерлигова О. П. и др.* Изменение структуры рыбного населения эвтрофируемого водоема / Отв. ред. М. И. Шатуновский. М.: Наука, 1982. 248 с.
- Решетников Ю. С.* Состояние биологического разнообразия и функционирование водных экосистем // Изучение и охрана разнообразия фауны, флоры и основных экосистем Евразии. М.: ИПЭЭ РАН, 2000. С. 264–270
- Терещенко В. Г.* Индексы для оценки биологического разнообразия сообщества и методы анализа его динамики // Динамика разнообразия гидробионтов во внутренних водоемах России / Под ред. В. Г. Папченкова; Ин-т биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2002а. С. 143–153.
- Терещенко В. Г.* Динамика биологического разнообразия рыбного населения озер при различных антропогенных воздействиях // Динамика разнообразия гидробионтов во внутренних водоемах России / Под ред. В. Г. Папченкова; Ин-т биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2002б. С. 154–173.
- Терещенко В. Г., Стрельников А. С.* Анализ перестройки в рыбной части озера Балхаш в результате интродукции новых видов рыб // Вопросы ихтиологии. 1995. Т. 35, вып. 1. С. 71–77.
- Терещенко В. Г., Терещенко Л. И., Сметанин М. М.* Оценка различных индексов для выражения биологического разнообразия сообщества // Биоразнообразие: Степень таксономической изученности. М., 1994. С. 86–97.
- Терещенко В. Г., Стерлигова О. П., Павлов В. Т., Ильмаст Н. В.* Многолетняя динамика структурных и системных характеристик рыбного населения эвтро-

фируемого Сязозера // Биология внутренних вод. 2004. № 3. С. 93–102.

Фрумин Г. Т. Динамика экологического состояния Ладожского озера // Экологическая химия. 2022. Т. 31(5). С. 253–257.

Шайхутдинова А. А. Методы оценки биоразнообразия: методические указания. Оренбург: ОГУ, 2019. 37 с.

Шитиков В. К., Розенберг Г. С. Оценка биоразнообразия: попытка формального обобщения // Количественные методы экологии и гидробиологии. Тольятти: СамНЦ РАН, 2005. С. 91–129.

## References

Bobylev S. N., Medvedeva O. E., Solov'eva S. N. Economics of biodiversity conservation: a handbook. GEF project *Conservation of Biodiversity of the Russian Federation*; Institute of Environmental Economics. Moscow; 2002. 604 p. (In Russ.)

Bolotova N. L. Problems of conservation of endangered fish populations in water bodies of the Vologda Region. *Monitoring bioraznoobraziya = Monitoring of biodiversity*. Moscow: Nauka; 1997. P. 36–45. (In Russ.)

Bolotova N. L. Biological diversity and problems of its conservation. *Nauka – shkole: Sb. nauch. statei = Science to School. Proceedings*. Iss. VI. St. Petersburg: Art-Express; 2017. P. 119–174. (In Russ.)

Bolotova N. L., Stepanov M. V., Frumin G. T., Bolotov O. V. Dynamics of diversity of fish population of large lakes of the Vologda Region. *Ozernye ekosistemy: biologicheskie protsessy, antropogennaya transformatsiya, kachestvo vody: Mat-ly V Mezhdunar. nauch. konf. (Minsk – Naroch', 12–17 sentyabrya 2016 goda) = Lake ecosystems: biological processes, anthropogenic transformation, and water quality: Proceedings of the Vint. scientific conference (Minsk - Naroch, Sept. 12-17, 2016)*. Minsk-Naroch; 2016. P. 283–284. (In Russ.)

Brodskii A. K. Biodiversity: structure, problems and conservation prospects. *Aspekty bioraznoobraziya: Sb. trudov Zoologicheskogo muzeya MGU im. M. V. Lomonosova = Aspects of biodiversity. Proceed. of the Zoological Museum of Moscow State University*. Vol. 54(1). Moscow: KMK; 2016. P. 380–396. (In Russ.)

Danilov M. B. Population dynamics of the main commercial fish of Lake Peipsi-Pskov: PhD (Cand. of Biol.) thesis. Moscow; 2023. 146 p. (In Russ.)

Draper N., Smith G. Applied regression analysis. Moscow: Finansy i statistika; 1986. 366 p. (In Russ.)

Frumin G. T. Dynamics of the ecological state of Lake Ladoga. *Ekologicheskaya khimiya = Ecological Chemistry*. 2022;31(5):253–257. (In Russ.)

Gorodnichev R. M. et al. Methods of environmental research. Fundamentals of statistical data processing: a study guide. Yakutsk: Izd. dom SVFU; 2019. 93 p. (In Russ.)

Kondrat'ev S. A., Mel'nik M. M., Shmakova M. V., Ulichev V. I. Diffuse biogenic load on Lake Peipus-Pskov from the Russian catchment area under modern conditions. *Obshchestvo. Sreda. Razvitie = Society. Environment. Development*. 2014;3(32):163–169. (In Russ.)

Makarova N. V., Trofimets V. Ya. Statistics in Excel. Moscow: Finansy i statistika; 2002. 368 p. (In Russ.)

Mal'ko S. V. Biodiversity: lecture notes. Kerch State Maritime Technological University. Kerch; 2020. 41 p. (In Russ.)

Magarran E. Ecological diversity and its measurement. Moscow: Mir; 1992. 181 p. (In Russ.)

Pesenko Yu. A. Principles and methods of quantitative analysis in faunistic studies. Moscow: Nauka; 1982. 288 p. (In Russ.)

Primack R. A primer of conservation biology. Transl. from English by O. S. Yakimenko, O. A. Zinovieva. Moscow: NUMTs; 2002. 256 p. (In Russ.)

Protasov A. A. Biodiversity and its assessment. Conceptual diversification. Kiev; 2002. 105 p. (In Russ.)

Reshetnikov Yu. S., Popova O. A., Sterligova O. P. et al. Changes in the structure of the fish population of an eutrophicated reservoir. Moscow: Nauka; 1982. 248 p. (In Russ.)

Reshetnikov Yu. S. State of biological diversity and functioning of aquatic ecosystems. *Izuchenie i okhrana raznoobraziya fauny, flory i osnovnykh ekosistem Evrazii = Study and protection of the diversity of fauna, flora and main ecosystems of Eurasia*. Moscow: IPEE RAN; 2000. P. 264–270.

Shaikhutdinova A. A. Methods of biodiversity assessment: guidelines. Orenburg: OSU; 2019. 37 p. (In Russ.)

Shitikov V. K., Rosenberg G. S. Biodiversity assessment: an attempt at formal generalization. *Kolichestvennye metody ekologii i gidrobiologii = Quantitative methods of ecology and hydrobiology*. Tolyatti: Samara SC RAS; 2005. P. 91–129. (In Russ.)

Tereshchenko V. G. Indices for assessing the biological diversity of a community and methods for analyzing its dynamics. *Dinamika raznoobraziya gidrobiontov vo vnutrennikh vodoemakh Rossii = Dynamics of the diversity of hydrobionts in inland waters of Russia*. Yaroslavl: YaGTU; 2002a. P. 143–153 (In Russ.)

Tereshchenko V. G. Dynamics of biological diversity of fish population of lakes under various anthropogenic impacts. *Dinamika raznoobraziya gidrobiontov vo vnutrennikh vodoemakh Rossii = Dynamics of the diversity of hydrobionts in inland waters of Russia*. Yaroslavl: YaGTU; 2002b. P. 154–173. (In Russ.)

Tereshchenko V. G., Strel'nikov A. S. Analysis of restructuring in the fish part of Lake Balkhash as a result of the introduction of new fish species. *Voprosy ikhtologii = Journal of Ichthyology*. 1995;35(1):71–77. (In Russ.)

Tereshchenko V. G., Tereshchenko L. I., Smetnin M. M. Evaluation of various indices for expressing the biological diversity of a community. *Bioraznoobraziya: Stepen' taksonomicheskoi izuchennosti = Biodiversity: Available taxonomic data*. Moscow; 1994. P. 86–97. (In Russ.)

Tereshchenko V. G., Sterligova O. P., Pavlov V. T., Ilmast N. V. Long-term dynamics of structural and systemic characteristics of the fish population of eutrophicated Lake Syamozero. *Biologiya vnutrennikh vod = Inland Water Biology*. 2004;3:93–102. (In Russ.)

Timm T., Raukas A., Haberman J., Jaani A. (eds.). Lake Pskov-Chudskoe. Tartu: Eesti Loodusfoto; 2012. 495 p. (In Russ.)

Zakharov V. M., Trofimov I. E. Assessment of the state of biodiversity: a study of development stability. Moscow: KMK; 2019. 160 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 29.01.2025; принята к публикации / accepted: 21.02.2025.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

**Фрумин Григорий Тевелевич**

д-р хим. наук, профессор, ведущий научный сотрудник  
научно-исследовательской лаборатории  
факультета географии

*e-mail: gfrumin@mail.ru*

**Михалап Сергей Геннадиевич**

руководитель филиала

*e-mail: pskovniro@vniro.ru*

#### **CONTRIBUTORS:**

**Frumin, Grigory**

Dr. Sci. (Chem.), Professor, Leading Researcher

**Mikhalap, Sergey**

Head of VNIRO Pskov Branch