

УДК 574.5

ПРИМЕНЕНИЕ ИНДЕКСОВ РАЗНООБРАЗИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИНАМИКИ ПРОМЫСЛОВЫХ ПОПУЛЯЦИЙ РЫБ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

Г. Т. Фрумин^{1*}, А. С. Шурухин²

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

²Санкт-Петербургский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии («ГосНИОРХ» им. Л. С. Берга) (наб. Макарова, 26, Санкт-Петербург, Россия, 199053)

В статье обсуждается актуальная проблема оценки динамики биологического разнообразия на примере промыслового рыбного населения Ладожского озера. Изменение структуры рыбной части озерного сообщества прослежено на материалах ихтиологических исследований и данных рыбопромысловой статистики за период 1946–2023 гг. Для математико-статистического анализа массив первичных данных промышленного вылова рыб был разделен на пятилетние периоды, кроме периода 2016–2023 гг. 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. В то же время достоверность оценки тенденции снижения разнообразия остается неоднозначным вопросом при применении различных индексов биоразнообразия. Целью данного исследования являлся сравнительный анализ информативности разных индексов биоразнообразия для оценки динамики видового разнообразия рыбного населения Ладожского озера. Используются шесть следующих индексов: индекс Шеннона (H), индекс Пиелу (E), индекс Шелдона (SH), индекс Животовского (μ), индекс Симпсона – индекс доминирования (C) и индекс разнообразия (D). Приведена матрица парных корреляций индексов биоразнообразия, примененных для оценки динамики разнообразия видовой структуры рыбного населения Ладожского озера. Установлена наибольшая информативность индексов Шелдона и Шеннона. С 1960 по 2023 г. величина индекса биоразнообразия Шелдона характеризуется высоким отрицательным трендом (по шкале Чеддока коэффициент корреляции $r = 0,74$).

Ключевые слова: Ладожское озеро; эвтрофирование; рыбное население; динамика видового разнообразия; индексы биоразнообразия; математические модели

Для цитирования: Фрумин Г. Т., Шурухин А. С. Применение индексов разнообразия для оценки динамики промысловых популяций рыб Ладожского озера // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 6. С. 97–105. doi: 10.17076/lim2102

G. T. Frumin^{1*}, A. S. Shurukhin². USING DIVERSITY INDICES TO ASSESS THE DYNAMICS OF COMMERCIAL FISH POPULATIONS IN LAKE LADOGA

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

²St. Petersburg branch of the All-Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography (GosNIORKh named after L. S. Berg) (26 nab. Makarova, 199053 St. Petersburg, Russia)

The article discusses the topical issue of assessing the dynamics of biological diversity through the case study of commercial fish populations of Lake Ladoga. Changes in the structure of fish community in the lake were traced using fishery statistics for the period 1946–2023. For the mathematical and statistical analysis, the primary dataset on industrial fish catches was divided into five-year periods, excluding the period 2016–2023 period. Despite the selectivity of harvesting, the structure of catches in long-term observation series quite adequately reflects the dynamics of the fish population and changes in its species diversity, represented by the catch composition and the biomass ratio of different fish species. However, the reliability of the assessment of the declining diversity trend is questionable when using different biodiversity indices. The purpose of this study was to comparatively analyze the performance of different biodiversity indices in assessing the dynamics of the species diversity of the fish population of Lake Ladoga. The following six indices were used: Shannon index (H), Pielou index (E), Sheldon index (SH), Zhivotovsky index (μ), Simpson's dominance (C) and diversity (D) indices. The matrix of pairwise correlations of biodiversity indices used to assess structural changes in the species diversity of the fish population of Lake Ladoga is presented. The Sheldon and Shannon indices were found to be the most informative. From 1960 to 2023, the Sheldon biodiversity index increased from 13.3 to 13.6, showing a high negative trend (correlation coefficient $r = 0.74$ on the Chaddock scale).

Keywords: Lake Ladoga; eutrophication; fish population; dynamics of species diversity; biodiversity indices; mathematical models

For citation: Frumin G. T., Shurukhin A. S. Using diversity indices to assess the dynamics of commercial fish populations in Lake Ladoga. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 6. P. 97–105. doi: 10.17076/lim2102

Введение

Актуальность проблемы сохранения и оценки биоразнообразия рассмотрена во многих публикациях [Мэгарран, 1992; Решетников, 2000; Бобылев и др., 2002; Протасов, 2002; Примак, 2002; Шитиков, Розенберг, 2005; Бродский, 2012, 2016; Болотова, 2017; Филатов, Меншуткин, 2017; Захаров, Трофимов, 2019; Шайхутдинова, 2019; Фрумин, 2022]. В водных экосистемах наглядным и практически значимым показателем сокращения биоразнообразия служит изменение видового разнообразия рыбного населения. Известно, что это связано с ухудшением условий обитания и воспроизводства в результате изменения трофического статуса, органического и токсического загрязнения водоемов [Решетников и др., 1982; Терещенко, Стрельников, 1995; Болотова, 1997; Терещенко, 2002а; Терещенко и др., 2004]. Данные негативные процессы охватили и крупнейшие глубоководные озера, к которым

относится Ладожское озеро [Ладожское..., 2000, 2002; Руховец и др., 2006; Особенности..., 2010; Румянцев, Кудерский, 2010; Исследование..., 2011; Ладога..., 2013; Моделирование..., 2016; Современное..., 2021].

Структура уловов, несмотря на селективность промысла, достаточно адекватно отражает динамику рыбного населения и изменение его видового разнообразия, представленного составом уловов и соотношением биомасс разных видов рыб. Сдвиги в структуре рыбного населения характеризуются изменением доминирующего комплекса видов, а также переходом части ценных видов в разряд редких и исчезающих, о чем свидетельствует их занесение в Красную книгу РФ и ее регионов [Красная..., 2018; Леонов, Шурухин, 2024].

Ценная ихтиофауна и важное рыбопромысловое значение Ладожского озера требует соответствующего мониторинга структуры рыбного населения и адекватной оценки изменения видового разнообразия.

Следует отметить, что в исследованиях динамики разнообразия рыбной части сообщества других водоемов на основе многолетних рядов наблюдений рыбопромысловой статистики есть опыт применения индекса биоразнообразия Шеннона [Терещенко и др., 1994, 2004; Терещенко, Стрельников, 1995; Терещенко, 2002б; 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.

Целью данной работы является сравнительный анализ информативности разных индексов биоразнообразия для оценки динамики видового разнообразия промыслового рыбного населения Ладожского озера.

Материалы и методы

Модельным полигоном для исследований динамики рыбного населения послужило Ладожское озеро как крупнейший рыбохозяйственный водоем, имеющий стратегические запасы водных ресурсов [Кудерский и др., 1997; Ладога..., 2013; Поздняков и др., 2021]. Его площадь зеркала достигает 17 872 км², максимальная глубина 230 м, средняя глубина 46,9 м, объем водной массы 848 км³ [Ладога..., 2013; Ладожское..., 2015].

Ихтиофауна Ладожского озера насчитывает 43–58 видов круглоротых и рыб [Правдин,

1956; Титенков, 1968; Кудерский, 1996, 2013; Дятлов, 2002].

Однако только немногие виды рыб имеют промысловое значение. В конце XX – первой четверти XXI в. это представители четырех семейств – корюшковые, окуневые, карповые и сиговые (6–7 видов), на долю которых приходится в среднем 95 % всей выловленной в озере рыбы [Леонов, Шурухин, 2024].

Использованная в расчетах информация по динамике и составу уловов основана на официальных данных рыбопромысловой статистики. Статистические данные по вылову водных биологических ресурсов приведены по материалам Северо-Западного территориального управления Росрыболовства.

Анализировался состав промысловых уловов, в котором представлены данные по вылову десяти основных промысловых видов рыб: судак, лещ, щука, налим, окунь, лосось озерный, сиги (все формы вида), ряпушка, корюшка, плотва.

В соответствии со сложившейся традицией анализируемые величины и состав уловов рассматривались как отражение состояния рыбных ресурсов.

Для математико-статистического анализа изменения состава уловов рыб массив первичных данных рыбопромысловой статистики с 1946 по 2023 г. был разделен на пятилетние периоды (табл. 1).

Для количественной оценки изменения разнообразия рыбного населения Ладожского озера по каждому 5-летнему периоду показателей рыбодобычи использованы шесть следующих индексов биоразнообразия: индекс Шеннона (H), индекс Пиелу (E), индекс Шелдона (SH), индекс Животовского (μ), индекс Симпсона: индекс доминирования (C) и индекс разнообразия (D) [Песенко, 1982] (табл. 2).

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

Таблица 1. Периодизация статистики рыбодобычи в Ладожском озере

Table 1. Periodization of fishing statistics in Lake Ladoga

Период Period	Годы Years	Период Period	Годы Years	Период Period	Годы Years
1	1946–1950	6	1971–1975	11	1996–2000
2	1951–1955	7	1976–1980	12	2001–2005
3	1956–1960	8	1981–1985	13	2006–2010
4	1961–1965	9	1986–1990	14	2011–2015
5	1966–1970	10	1991–1995	15	2016–2023

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

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

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 (μ) Zhivotovsky (μ)	$\mu = [\sum (p_i)]^2$
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)	$D = 1/C$

Результаты и обсуждение

Формирование запасов и уловов рыб Ладожского озера, многолетняя динамика их развития происходят под влиянием главным образом абиотических факторов среды [Антонов, 2007]. В XX–XXI веке динамика уловов в целом имеет вид долгопериодных циклов, отражающих изменения продукционного состояния водоема, что привело к снижению промысловой рыбопродуктивности Ладожского озера и повлияло на величину общего вылова рыбы. Определенные изменения наблюдаются и в видовой структуре уловов [Кудерский, 2013; Леонов, Шурухин, 2024].

Для сравнительного анализа динамики видового разнообразия рыбного населения Ладожского озера проведены расчеты с использованием шести индексов, применяемых в оценке биоразнообразия сообществ экосистем (табл. 3). Для выбора наиболее информативного индекса биоразнообразия, отражающего тренд изменения видового разнообразия рыбного населения Ладожского озера, были построены регрессионные уравнения между индексами и периодами рыбодобычи, а также определены их статистические характеристики (табл. 4). Наиболее пригодное статистически значимое уравнение должно иметь наибольшее

Таблица 3. Показатели изменения разнообразия рыбного населения Ладожского озера, рассчитанные по разным индексам биоразнообразия

Table 3. Indicators of change in the diversity of the fish population of Lake Ladoga, calculated using different biodiversity indices

Годы Years	Индексы разнообразия Diversity indices					
	H	E	D	C	μ	SH
1946–1950	2,59	0,78	4,69	0,21	7,37	13,33
1951–1955	2,81	0,85	5,46	0,18	8,19	16,61
1956–1960	2,68	0,81	5,06	0,20	7,66	14,59
1961–1965	2,72	0,82	5,50	0,18	7,65	15,18
1966–1970	2,70	0,81	5,43	0,18	7,61	14,88
1971–1975	2,60	0,78	5,03	0,20	7,30	13,46
1976–1980	2,66	0,80	5,36	0,19	7,34	14,30
1981–1985	2,59	0,82	5,11	0,20	7,08	13,33
1986–1990	2,62	0,83	5,27	0,19	7,23	13,74
1991–1995	2,45	0,77	4,39	0,23	6,63	11,59
1996–2000	2,56	0,81	5,12	0,20	6,78	12,94
2001–2005	2,44	0,77	4,37	0,23	6,58	11,47
2006–2010	2,32	0,70	3,89	0,26	6,43	10,18
2011–2015	2,27	0,68	3,66	0,27	6,29	9,68
2016–2023	2,61	0,75	4,47	0,22	7,80	13,60

значение F_p , наибольший коэффициент корреляции r и наименьшую стандартную ошибку σ . 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].

Как следует из приведенных в табл. 4 статистических показателей, все регрессионные уравнения адекватны ($F_p > F_T$), но не могут быть использованы для прогнозирования ($F_p/F_T < 4$).

Наиболее информативными индексами для оценки динамики разнообразия рыбного населения Ладожского озера являются индекс Шеннона ($r = 0,73$; $F_p/F_T = 3,3$) и индекс Шелдона ($r = 0,74$; $F_p/F_T = 3,4$) (рис.).

Чем выше значения индекса Шеннона и индекса Шелдона, тем выше уровень видового разнообразия. Индекс Шелдона наиболее чувствителен к изменению вклада видов. Линия регрессии на рисунке свидетельствует об отрицательном тренде индекса Шелдона за рассматриваемый период и, соответственно, о снижении разнообразия рыбного населения Ладожского озера.

Информативность индекса биоразнообразия Шелдона связана с возможностью оценки зависимости разнообразия рыбного населения Ладожского озера от естественных и антропогенных факторов (эвтрофирование, интродукция рыб, токсическое и тепловое загрязнение).

Парные корреляции индексов разнообразия рыбного населения в Ладожском озере представлены в табл. 5.

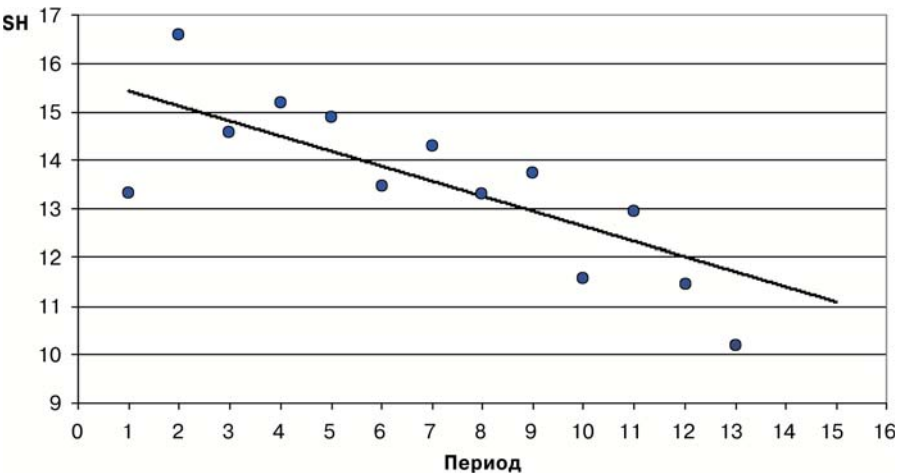
Таблица 4. Регрессионные уравнения и статистические характеристики индексов биоразнообразия, отражающие изменения разнообразия рыбного населения Ладожского озера

Table 4. Regression equations and statistical characteristics of biodiversity indices reflecting changes in the diversity of the fish population of Lake Ladoga

Регрессионные уравнения Regression equations	Статистические показатели Statistical characteristics				
	n	σ	r	F_p	F_p/F_T
$H = 2,77 - 0,024 \cdot \text{период/period}$	15	0,10	0,73	15,0	3,3
$E = 0,84 - 0,0067 \cdot \text{период/period}$	15	0,04	0,66	10,2	2,2
$C = 0,17 + 0,0044 \cdot \text{период/period}$	15	0,02	0,70	12,8	2,8
$D = 5,57 - 0,089 \cdot \text{период/period}$	15	0,44	0,69	11,6	2,5
$\mu = 7,85 - 0,081 \cdot \text{период/period}$	15	0,43	0,66	9,8	2,1
$SH = 15,74 - 0,31 \cdot \text{период/period}$	15	1,31	0,74	15,6	3,4

Примечание. n – число наблюдений, r – коэффициент корреляции, σ – 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, σ – standard error, F_p – calculated value of Fisher's test, F_T – tabulated value of Fisher's test at a significance level of 95 %.



Динамика индекса разнообразия Шелдона (SH) рыбного населения Ладожского озера

Dynamics of the Sheldon diversity index (SH) of the fish population of Lake Ladoga

Согласно шкале Чеддока теснота связи между индексом Шелдона (SH) и индексом Пие-лу (E) характеризуется как «высокая», а между индексом Шелдона и другими индексами –

как «весьма высокая» [Макарова, Трофимец, 2002]. Оценка парной корреляции между индексами разнообразия позволяет выбрать наиболее репрезентативный из них.

Таблица 5. Матрица парных корреляций индексов биоразнообразия промысловых рыб в Ладожском озере
Table 5. Matrix of paired correlations of biodiversity indices of commercial fish in Lake Ladoga

Индекс Index	H	E	C	D	μ	SH
H	1	0,89	0,95	0,92	0,93	0,996
E	0,89	1	0,95	0,94	0,69	0,87
C	0,95	0,95	1	0,99	0,79	0,94
D	0,92	0,94	0,99	1	0,73	0,91
μ	0,93	0,69	0,79	0,73	1	0,94
SH	0,996	0,87	0,94	0,91	0,94	1

Заключение

Впервые для Ладожского озера проведена оценка динамики разнообразия рыбного населения по многолетним рядам рыбопромысловой статистики более чем за 75-летний период. Для количественной оценки биоразнообразия использованы шесть следующих индексов: индекс Шеннона (H), индекс Пиелу (E), индекс Шелдона (SH), индекс Животовского (μ), индекс Симпсона – индекс доминирования (C) и индекс разнообразия (D). Установлено, что наиболее информативными индексами для оценки биоразнообразия в Ладожском озере являются индексы Шеннона и Шелдона.

Литература

Антонов А. Е. Природная циклоэнергетика. Гидрометеорология и рыбопромысловое прогнозирование. СПб.: Гидрометеоиздат, 2007. 216 с.

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. Биологическое разнообразие и проблемы его сохранения // Наука – школе: Сб. науч. статей. Вып. VI. СПб.: Арт-Экспресс, 2017. С. 119–174.

Болотова Н. Л. Проблемы сохранения исчезающих популяций рыб в водоемах Вологодской области // Мониторинг биоразнообразия. М.: Наука, 1997. С. 36–45.

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 государственный университет. 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.

Бродский А. К. Ускользающая реальность: Биоразнообразие: его роль в поддержании жизни на Земле, закономерности формирования и разрушения. СПб.: ДЕАН, 2012. 172 с.

Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Финансы и статистика, 1986. 366 с.

Дятлов М. А. Рыбы Ладожского озера. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2002. С. 39–45.

Захаров В. М., Трофимов И. Е. Оценка состояния биоразнообразия: исследование стабильности развития. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2019. 160 с.

Зверев И. С., Ушаков К. В., Шипунова Е. А., Голосов С. Д., Ибраев Р. А. Моделирование гидротермодинамики Ладожского озера // Всерос. конф. по крупным внутренним водоемам (V Ладожский симпозиум). СПб.: Лема, 2016. С. 41–49.

Красная книга Ленинградской области: Животные / Гл. ред. Ю. Н. Бубличенко, С. М. Голубков, П. В. Кияшко. СПб.: Папирус, 2018. 560 с.

Кудерский Л. А. Состояние рыбного населения Ладожского озера в 1946–2005 гг. в связи с природными и антропогенными факторами // Исследования по ихтиологии, рыбному хозяйству и смежным дисциплинам. СПб.-М.: КМК, 2013. С. 264–288.

Кудерский Л. А. Состояние рыбных ресурсов Ладожского озера, р. Нева и восточной части Финского залива // Экологическое состояние водоемов и водотоков бассейна реки Невы. СПб.: СПбНЦ РАН, 1996. С. 131–154.

Кудерский Л. А., Печников А. С., Шимановская Л. Н. Рыбные ресурсы Ладожского и Онежского озер. М.: ВНИЭРХ, 1997. 40 с.

- Кудерский Л. А. Управление формированием рыбных ресурсов и их использованием (на примере Ладожского озера) // *Aquaterra*: Сб. матер. конф. СПб., 2004. С. 191–193.
- Ладога / Ред. В. А. Румянцев, С. А. Кондратьев. СПб., 2013. 560 с.
- Ладожское озеро и достопримечательности его побережья. Атлас / Ред. В. А. Румянцев. СПб.: Нестор-История, 2015. 200 с.
- Ладожское озеро. Мониторинг, исследование современного состояния и проблемы управления Ладожским озером и другими большими озерами / Под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2000. 488 с.
- Ладожское озеро – прошлое, настоящее, будущее / Под ред. В. А. Румянцева, В. Г. Драбковой. СПб.: Наука, 2002. 326 с.
- Леонов А. Г., Шурухин А. С. Состояние рыбных запасов и промысла основных промысловых видов рыб Ладожского озера в XXI веке // *Вопросы рыболовства*. 2024. Т. 25(3). С. 55–76. doi: 10.36038/0234-2774-2024-25-3-55-76
- Макарова Н. В., Трофимец В. Я. Статистика в Excel. М.: Финансы и статистика, 2002. 368 с.
- Малько С. В. Биоразнообразие. Конспект лекций. 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.
- Петрова Н. А., Петрова Т. Н., Сусарева О. М., Иофина И. В. Особенности эволюции экосистемы Ладожского озера под влиянием антропогенного эвтрофирования // *Водные ресурсы*. 2010. Т. 37, № 5. С. 580–590.
- Поздняков Ш. Р., Кондратьев С. А., Расулова А. М., Коробченкова К. Д. Ладожское озеро – геостратегический водный объект Северо-Запада России и его зоны экологического риска // *Гидрометеорология и экология*. 2021. № 62. С. 139–161. doi: 10.33933/2074-2762-2021-62-139-161
- Правдин И. Ф. Видовой состав ихтиофауны Ладожского озера и Приладожья // *Известия ВНИОРХ*. 1956. Т. 38. С. 12–30.
- Примаков Р. Основы сохранения биоразнообразия / Пер. с англ. О. С. Якименко, О. А. Зиновьевой. М.: НУМЦ, 2002. 256 с.
- Протасов А. А. Биоразнообразие и его оценка. Концептуальная диверсикология. Киев, 2002. 105 с.
- Решетников Ю. С., Попова О. А., Стерлигова О. Н., Шатуновский М. И. Изменение рыбного населения эвтрофируемого водоема. 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.
- Румянцев В. А., Кудерский Л. А. Ладожское озеро: общая характеристика, экологическое состояние // *Общество. Среда. Развитие (Terra Humana)*. 2010. № 1. С. 171–182.
- Руховец Л. А., Астраханцев Г. П., Минина Т. Р., Петрова Н. А., Полосков В. Н. Оценка возможных изменений в экосистеме Ладожского озера в 21 веке под влиянием антропогенных и климатических факторов // *Водные ресурсы*. 2006. Т. 33, № 3. С. 367–382.
- Руховец Л. А., Петрова Н. А., Меншуткин В. В., Астраханцев Г. П., Минина Т. Р., Полосков В. Н., Петрова Т. Н., Сусарева О. М. Исследование реакции экосистемы Ладожского озера на снижение фосфорной нагрузки // *Водные ресурсы*. 2011. Т. 38, № 6. С. 740–752.
- Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата / Ред. С. А. Кондратьев и др. М.: РАН, 2021. 637 с. doi: 10.12731/978-5-907366-50-3
- 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, 2002а. С. 154–173.
- 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, 2002б. С. 143–153.
- Терещенко В. Г., Стерлигова О. П., Павлов В. Т., Ильмаст Н. В. Многолетняя динамика структурных и системных характеристик рыбного населения эвтрофируемого Сямозера // *Биология внутренних вод*. 2004. № 3. С. 93–102.
- 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.
- Титенков И. С. Рыбы и рыбный промысел Ладожского озера // *Биологические ресурсы Ладожского озера*. Зоология. Л., 1968. С. 130–173.
- Филатов Н. Н., Меншуткин В. В. Проблемы оценки изменений экосистем крупных стратифицированных водоемов под влиянием климата и антропогенных факторов // *Ученые записки РГГУ*. 2017. № 48. С. 120–147.
- 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 гидробиологии*. Тольятти: СамНЦ РАН, 2005. С. 91–129.

References

- Antonov A. E. Natural cycloenergetics. Hydrometeorology and fishery forecasting. St. Petersburg: Gidrometeoizdat; 2007. 216 p. (In Russ.)
- 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 Nature Management Economics. Moscow; 2002. 604 p. (In Russ.)
- Bolotova N. L. Biological diversity and problems of its conservation. *Nauka – shkole: Sb. nauch. statei = Science for School: Proceed. Iss. VI*. St. Petersburg: Art-Express; 2017. P. 119–174. (In Russ.)
- Bolotova N. L. Problems of conservation of endangered fish populations in water bodies of the Vologda Region. *Monitoring bioraznobraziya = Monitoring of Biodiversity*. Moscow: Nauka; 1997. P. 36–45. (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: Proceed. V int. sci. conf. (Minsk – Naroch, Sept. 12-17, 2016)*. Minsk-Naroch; 2016. P. 283–284. (In Russ.)
- Brodskii A. K. Biodiversity: structure, problems, and prospects of conservation. *Aspekty bioraznobraziya: Sb. trudov Zoologicheskogo muzeya MGU im. M. V. Lomonosova = Aspects of biodiversity: Proceed. of the Zoological Museum of Lomonosov Moscow State University*. Vol. 54(1). Moscow: KMK; 2016. P. 380–396. (In Russ.)
- Brodskii A. K. Elusive reality. Biodiversity: its role in sustaining life on Earth, patterns of formation and destruction. St. Petersburg: DEAN; 2012. 172 p. (In Russ.)
- Bublichenko Yu. N., Golubkov S. M., Kiyashko P. V. (eds.). The Red Data Book of the Leningrad Region: Animals. St. Petersburg: Papirus; 2018. 560 p. (In Russ.)
- Draper N., Smith G. Applied regression analysis. Moscow: Finance and Statistics; 1986. 366 p. (In Russ.)
- Dyatlov M. A. Fishes of Lake Ladoga. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2002. P. 39–45. (In Russ.)
- Filatov N. N. (ed.). Lake Ladoga. Monitoring, research of the current state and problems of management of Lake Ladoga and other large lakes. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2000. 488 p. (In Russ.)
- Filatov N. N., Menshutkin V. V. Problems of assessing changes in ecosystems of large stratified reservoirs under the influence of climate and anthropogenic factors. *Uchenye zapiski RGGU = Proceed. of the Russian State Hydrometeorological University*. 2017;48: 120–147. (In Russ.)
- Frumin G. T. Dynamics of the ecological state of Lake Ladoga. *Ekologicheskaya khimiya = Ecological Chemistry*. 2022;31(5):253–257. (In Russ.)
- Kuderskii L. A. Management of the formation of fish resources and their use (on the example of Lake Ladoga). *Aquaterra: Sb. mater. konf. = Aquaterra: Proceed. of the conference*. St. Petersburg; 2004. P. 191–193. (In Russ.)
- Kuderskii L. A. State of fish resources of Lake Ladoga, the Neva River and the eastern part of the Gulf of Finland. *Ekologicheskoe sostoyanie vodoyomov i vodotokov basseina reki Nevy = Ecological state of water bodies and watercourses of the Neva River basin*. St. Petersburg: SPbNTs RAN; 1996. P. 131–154. (In Russ.)
- Kuderskii L. A. The state of the fish population of Lake Ladoga in 1946–2005 in connection with natural and anthropogenic factors. *Issledovaniya po ikhtiologii, rybnomu khozyaystvu i smezhnym distsiplinam = Research in ichthyology, fisheries and related disciplines*. St. Petersburg-Moscow: KMK; 2013. P. 264–288. (In Russ.)
- Kuderskii L. A., Pechnikov A. S., Shimanovskaya L. N. Fish resources of Lakes Ladoga and Onega. Moscow: VNIERKh; 1997. 40 p. (In Russ.)
- Kondrat'ev S. A. et al. (eds.). Current state and problems of anthropogenic transformation of the ecosystem of Lake Ladoga in a changing climate: a monograph. Moscow: RAN; 2021. 637 p. (In Russ.). doi: 10.12731/978-5-907366-50-3
- Leonov A. G., Shurukhin A. S. Status of the fish stocks and fisheries of the main commercial fish species of Lake Ladoga in the XXI century. *Problems of Fisheries*. 2024;25(3):55–76. (In Russ.). doi: 10.36038/0234-2774-2024-25-3-55-76
- Magarran E. Ecological diversity and its measurement. Moscow: Mir; 1992. 181 p. (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; 2020. 41 p. (In Russ.)
- Pesenko Yu. A. Principles and methods of quantitative analysis in faunistic studies. Moscow: Nauka; 1982. 288 p. (In Russ.)
- Petrova N. A., Petrova T. N., Susareva O. M., Iofina I. V. Features of the evolution of the Lake Ladoga ecosystem under the influence of anthropogenic eutrophication. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2010;37(5):580–590. (In Russ.)
- Pozdnyakov Sh. R., Kondrat'ev S. A., Rasulova A. M., Korobchenkova K. D. Lake Ladoga – a geostrategic water body of the North-West of Russia and its zones of environmental risk. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and Ecology*. 2021;62:139–161. (In Russ.). doi: 10.33933/2074-2762-2021-62-139-161
- Pravdin I. F. Species composition of the ichthyofauna of Lake Ladoga and the Ladoga region. *Izvestiya VNIORKh*. 1956;38:12–30. (In Russ.)
- Primak R. Fundamentals of biodiversity conservation. 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. N., Shatunovskii M. I. Changes in 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 raznobraziya fauny, flory i osnovnykh ekosistem Evrazii = Study and protection of diversity of fauna, flora and main ecosystems of Eurasia*. Moscow: IPEE RAN; 2000. P. 264–270. (In Russ.)

Rukhovets L. A., Astrakhantsev G. P., Minina T. R., Petrova N. A., Poloskov V. N. Assessment of possible changes in the ecosystem of Lake Ladoga in the 21st century under the influence of anthropogenic and climatic factors. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2006;33(3):367–382. (In Russ.)

Rukhovets L. A., Petrova N. A., Menshutkin V. V., Astrakhantsev G. P., Minina T. R., Poloskov V. N., Petrova T. N., Susareva O. M. Study of the response of the Ladoga Lake ecosystem to a decrease in phosphorus load. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2011;38(6):740–752. (In Russ.)

Rumyantsev V. A. (ed.). Lake Ladoga and the sights of its coast. Atlas. St. Petersburg: Nestor-History; 2015. 200 p. (In Russ.)

Rumyantsev V. A., Drabkova V. G. (eds.). Lake Ladoga – past, present, future. St. Petersburg: Nauka, 2002. 326 p. (In Russ.)

Rumyantsev V. A., Kondrat'ev S. A. (eds.). Ladoga. St. Petersburg: INOZ RAS; 2013. 560 p. (In Russ.)

Rumyantsev V. A., Kuderskii L. A. Lake Ladoga: general characteristics, ecological state. *Obshchestvo. Sreda. Razvitie (Terra Humana) = Society. Environment. Development (Terra Humana)*. 2010;1:171–182. (In Russ.)

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

Shitikov V. K., Rosenberg G. S. Biodiversity assessment: an attempt at formal generalization. *Kolichestvennye metody ekologii gidrobiologii = Quantitative methods of ecology of hydrobiology*. Tolyatti: SamNTs RAN; 2005. P. 91–129. (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; 2002. P. 154–173. (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; 2002. P. 143–153. (In Russ.)

Tereshchenko V. G., Sterligova O. P., Pavlov V. T., Il'mast N. V. Long-term dynamics of structural and systemic characteristics of the fish population of eutrophicated Syamozero. *Biologiya vnutrennikh vod = Inland Water Biology*. 2004;3:93–102. (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 ikhtiologii = 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. *Bioraznoobrazie: Stepen' taksonomicheskoi izuchennosti = Biodiversity: The degree of taxonomic study*. Moscow; 1994. P. 86–97. (In Russ.)

Titenkov I. S. Fishes and fisheries of Lake Ladoga. *Biologicheskie resursy Ladozhskogo ozera. Zoologiya = Biological resources of Lake Ladoga. Zoology*. Leningrad; 1968. P. 130–173. (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.)

Zverev I. S., Ushakov K. V., Shipunova E. A., Golosov S. D., Ibraev R. A. Modeling of hydrothermodynamics of Lake Ladoga. *Vseros. konf. po krupnym vnutrennim vodoemam (V Ladozhskii simpozium) = All-Russian conf. on large inland water bodies (V Ladoga symposium)*. St. Petersburg: Lema; 2016. P. 41–49. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 12.05.2025; принята к публикации / accepted: 18.09.2025.
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
e-mail: gfrumin@mail.ru

Шурухин Александр Степанович

канд. биол. наук, ведущий научный сотрудник
e-mail: prognozfish@rambler.ru

CONTRIBUTORS:

Frumin, Grigory

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

Shurukhin, Alexander

Cand. Sci. (Biol.), Leading Researcher