

DOI 10.31029/vestdnc100/3

УДК 579.26:556.55(268.45)

МИКОБИОТА УЛЬТРАПРОФУНДАЛЬНОЙ ЗОНЫ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

И. В. Иофина, ORCID: 0009-0005-8249-6023
Институт озероведения РАН – СПб ФИЦ РАН

MYCOBIOTA OF THE ULTRAPROFUNDAL ZONE OF LAKE LADOGA

I. V. Iofina, ORCID: 0009-0005-8249-6023
Institute of Limnology RAS – St.Petersburg FRC RAS

Аннотация. Последние исследования глубоководной части (ультрапрофундальной) Ладожского озера выявили заметные изменения в показателях, связанных с продукционно-деструкционным балансом, что определяет доминирование процессов минерализации органического вещества в экосистеме. Изменение лимнических характеристик самой большой по объему водной массы озера может привести к деградации экосистемы озера. В статье представлен комплексный анализ современного состояния водных микромицетов глубоководных станций в ультрапрофундальной зоне Ладожского озера. Было выделено и идентифицировано 14 видов, а также белый стерильный мицелий. Грибы разделены на несколько групп в зависимости от их таксономической принадлежности и относятся к двум царствам и четырем отделам. Установлено, что наибольшая численность водных грибов наблюдается в летний период в придонных горизонтах.

Abstract. Recent studies of the deep-water (ultra-profundal) part of Lake Ladoga have revealed significant changes in parameters related to the production-destruction balance, which determines the dominance of organic matter mineralization processes in the ecosystem. Changes in the limnic characteristics of the largest volume water mass could lead to the degradation of the lake's ecosystem. This article presents a comprehensive analysis of the current state of aquatic mycoflora at two deep-water stations in the ultra-profundal zone of Lake Ladoga. Fourteen species, as well as white sterile mycelium, were isolated and identified. The fungi are divided into several groups based on their taxonomic affiliation and belong to two kingdoms and four divisions. It was found that the highest abundance of aquatic fungi is observed in the bottom layers during the summer.

Ключевые слова: численность водных грибов, сезонная динамика, ультрапрофундальный район Ладожского озера.

Keywords: aquatic fungi, seasonal dynamics, ultra-profundal zone, Lake Ladoga.

Введение

Многолетние наблюдения, проводившиеся на Ладожском озере, показали, что за прошедшие 10 лет проявились заметные изменения в показателях, связанных с продукционно-деструкционным балансом в озере (концентрации общего и минерального фосфора, величины водородного показателя и относительного содержания кислорода в воде) [1]. Эти изменения отмечаются в ультрапрофундальной лимнической зоне, выделенной на основе морфометрического районирования [2]. Этот район находится в северной части озера и представляет собой самую консервативную область озера. Средняя глубина составляет 100–150 метров, максимальная 230. С позиции продукционно-деструкционных соотношений в экосистеме озера мелководные зоны и летний эпилимнион глубоководных зон представляют собой преимущественно трофогенную, а озерный гиполимнион, наибольшая часть которого лежит в глубоководных зонах, – трофолитическую области озерной массы. Преобладание трофолитической области над трофогенной определяет доминирование процессов минерализации органического вещества в экосистеме [1]. Изменение лимнических характеристик водной массы глубоководной зоны может привести к деградации экосистемы озера. Многолетние наблюдения на озере показали, что вода основной водной массы достаточно однородна, поэтому концентрации показателей, полученные на какой-либо станции в пределах ультрапрофундальной зоны, могут с достаточной степенью точности характеризовать эту зону [3]. Этот факт побудил интерес к изучению водной микобиоты в ультрапрофундальном районе озера.

Методы исследования

В 2024 г. проводились наблюдения на двух глубоководных станциях с глубинами более 200 м, расположенных в северо-западной части озера в ультрапрофундальной лимнической зоне. Схема расположения станций показана на рис. 1. Исследования проводились в сроки, приуроченные к гидрологическим сезонам. На ст. 105 – весной (июнь) в условиях существования термобара, когда глубоководная зона

лежала в теплоинертной области в условиях гомотермии, на ст. 105 и 109 – летом (июль) в период устойчивой стратификации и четкого разделения озера на эпилимнион и гиполимнион. Пробы воды отбирались по вертикали от поверхности до дна на стандартных горизонтах с глубинами 0,3, 10, 25, 50, 100, 150 метров и в придонном горизонте (в зависимости от глубины станции). Образцы отбирали по стандартным методикам [4–8] в пластиковые стерильные банки. Определялась общая численность микопланктона и видовой состав. Для выделения водных грибов был использован метод глубинного посева воды. Объем пробы в опытах был 1 мл воды (в трех повторностях), использовалась агаризованная питательная среда – среда Сабуро. Для подавления роста бактерий в расплавленную остывшую среду добавляли антибиотик цефотаксин (100 мг/л). Опыты проводились в чашках Петри. Выделение чистых культур происходило на 3-и сутки инкубации. Подсчет колоний проводили через 8 суток [8]. Видовое определение культур осуществлялось по определителям российских и зарубежных авторов [7; 9–12]. Таксономическая система строилась на основе современных представлений о полифилетическом происхождении грибоподобных организмов с выделением царств Protoctista и настоящих грибов Fungi. Названия таксонов унифицировали с использованием международной электронной базы данных Index Fungorum (2021) [13]. Общую численность водных грибов выражали в КОЕ/мл. Видовое определение чистых культур водных грибов проводили с использованием светового микроскопа. Статистическую обработку проводили в программе Microsoft Office Excel 2010.

Результаты

Грибы и грибоподобные организмы играют важную роль, наряду с другими группами в деструкции органического вещества и биодеградации всех органических субстратов, находящихся в воде как естественного, так и антропогенного происхождения [14–21]. Развитие водной микобиоты в Ладожском озере связано с возникновением дефицита биологически доступного (минерального) фосфора [22–25]. В последние годы отмечаются изменения в режиме минерального фосфора, связанные с его более интенсивным потреблением. С 2016 г. концентрация минерального фосфора в гиполимнионе в 100% случаев оказалось ниже предела обнаружения [1; 3; 26; 27].

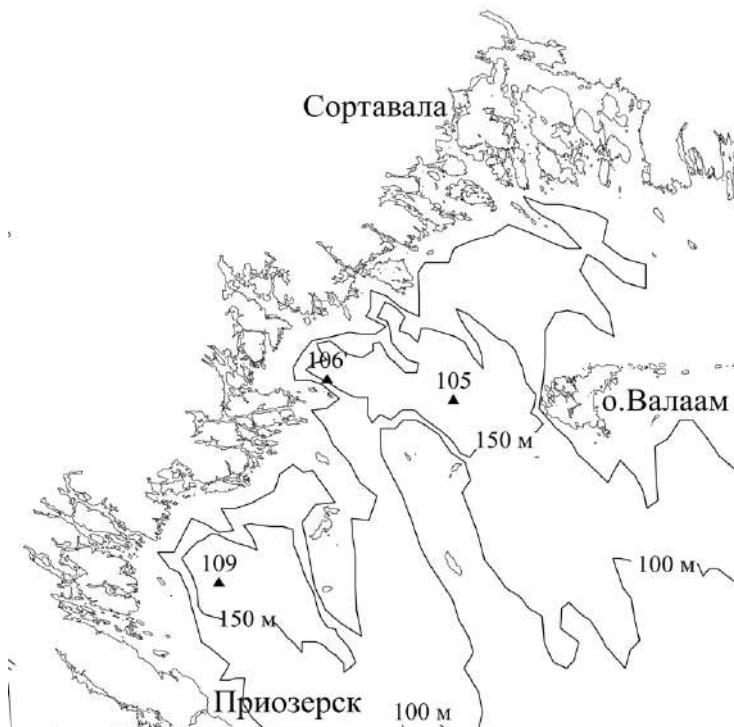


Рис. 1. Схема расположения станций в северо-западной части Ладожского озера

К настоящему времени в Ладожском озере выделено 53 вида водных грибов [22; 23]. На двух глубоководных станциях видовой состав был разделен на несколько групп, в зависимости от их таксономической принадлежности. Они относятся к царству Fungi, 2 отделам, 4 классам, 5 семействам

и 14 видам. Часто встречающимися оказались *Pichia kudriavzevii* Boidin, Pignal & Besson (*Candida krusei* (Castell) Berkhout), *Nakaseomyces glabratus* (H.W.Anderson) Sugita & Takashima (*Torulopsis candida* (Saito) Lodder) и *Rhodotorula rubrum* (Schimon) F.C. Harrison, Nouveau Traité Méd. (табл. 1). Начиная с 2017 г. массовое развитие дрожжевых организмов привело к вытеснению других представителей микобиоты из доминирующего комплекса озера, таких как *Trichoderma viride* Pers., *Mucor circinelloides* (Tieghem) и *Saprolegnia ferax* (Gruith) [23]. Исследования 2024 г. показали сохранение этой тенденции.

Количественный анализ вертикального распределения водных грибов ст. 105 показан на рис. 2. В июне в поверхностных горизонтах численность была выше, чем в июле. Это, очевидно, связано с сезонным прогревом воды на данных горизонтах. Затем она поднималась и достигала своего максимума в придонных слоях (25 КОЕ/мл в июне и 36 КОЕ/мл в июле). Численное распределение водных грибов на ст. 109 сохранило тенденцию увеличения от поверхностных горизонтов (3 КОЕ/мл) до 15 КОЕ/мл в придонных слоях.

Таблица 1. Доминирующий комплекс и таксономическая структура микобиоты ультрапрофундального района Ладожского озера (ст. 105 и ст. 109)

Виды	Ст. 105	Ст. 109
Fungi		
Отдел Ascomycota		
Класс Eurotiomycetes Семейство Aspergillaceae Род Aspergillus <i>Aspergillus ustus</i> Bainier Thom et Church	+	+
Класс Eurotiomycetes Семейство Aspergillaceae Род Penicillium <i>Penicillium chrysogenum</i> Thom	+	
Класс Saccharomycetales Семейство Pichiaceae Род Pichia <i>Pichia kudriavzevii</i> Boidin, Pignal & Besson (<i>Candida krusei</i> (Castell) Berkhout)	+	+
Класс Saccharomycetales Семейство Saccharomycetaceae Род Nakaseomyces <i>Nakaseomyces glabratus</i> (H.W.Anderson) Sugita & Takashima (<i>Torulopsis candida</i> (Saito) Lodder)	+	+
Отдел Basidiomycota		
Класс Microbotryomycetes Семейство Sporidiobolaceae Род Rhodotorula <i>Rhodotorula rubrum</i> (Schimon) F.C. Harrison, Nouveau Traité Méd	+	+

Химические данные подтверждают, что количество минерального фосфора в июне было минимальным, в июле оказалось ниже предела обнаружения и только в поверхностном слое присутствовали его следы (0,1 мкг Р л⁻¹) [3].

Представляется возможным сравнить количественные данные водных грибов, полученные на ст. 105 в разные годы (рис. 3). Для двух предыдущих лет характерны высокие значения численности в поверхностных горизонтах, тогда как в 2024 г. она была минимальна и составляла 1 КОЕ/мл. В придонных слоях на протяжении трех лет наблюдений регистрировались высокие значения с максимумом в 2024 г. (36 КОЕ/мл).

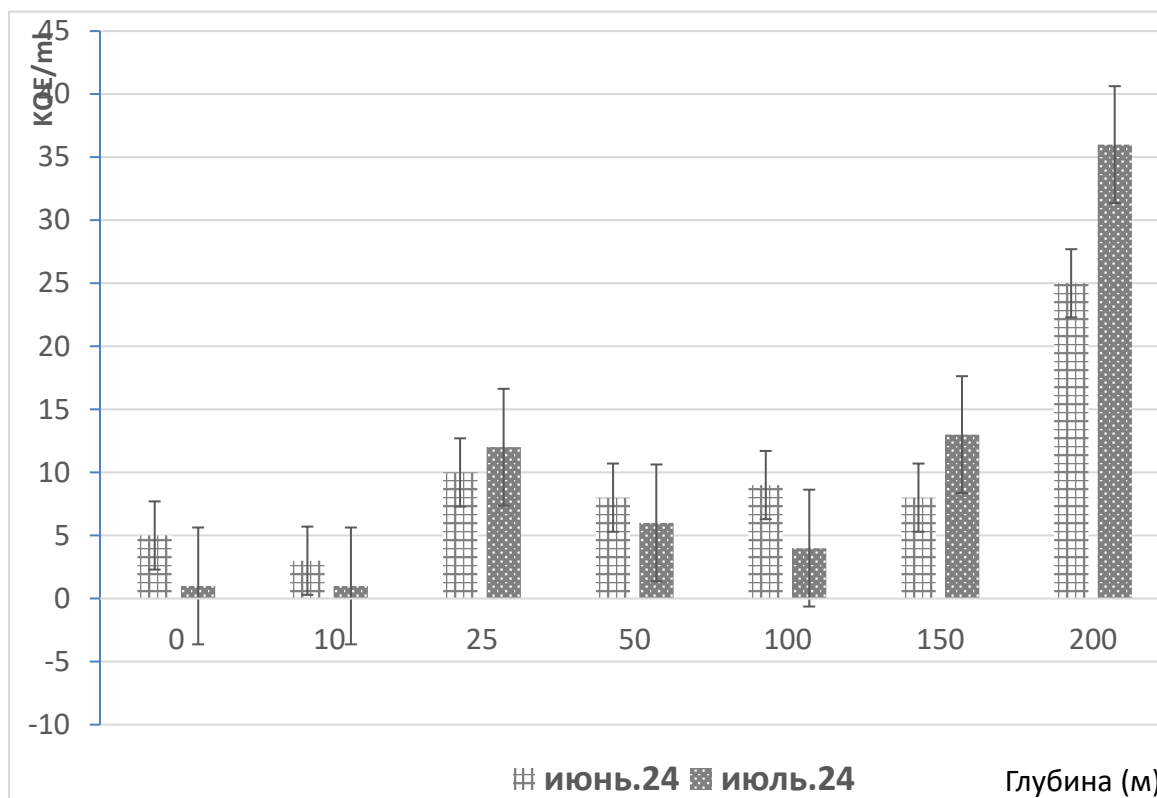


Рис. 2. Вертикальное распределение численности водных грибов на ст. 105 Ладожского озера весной (июнь) и летом (июль) 2024 г.

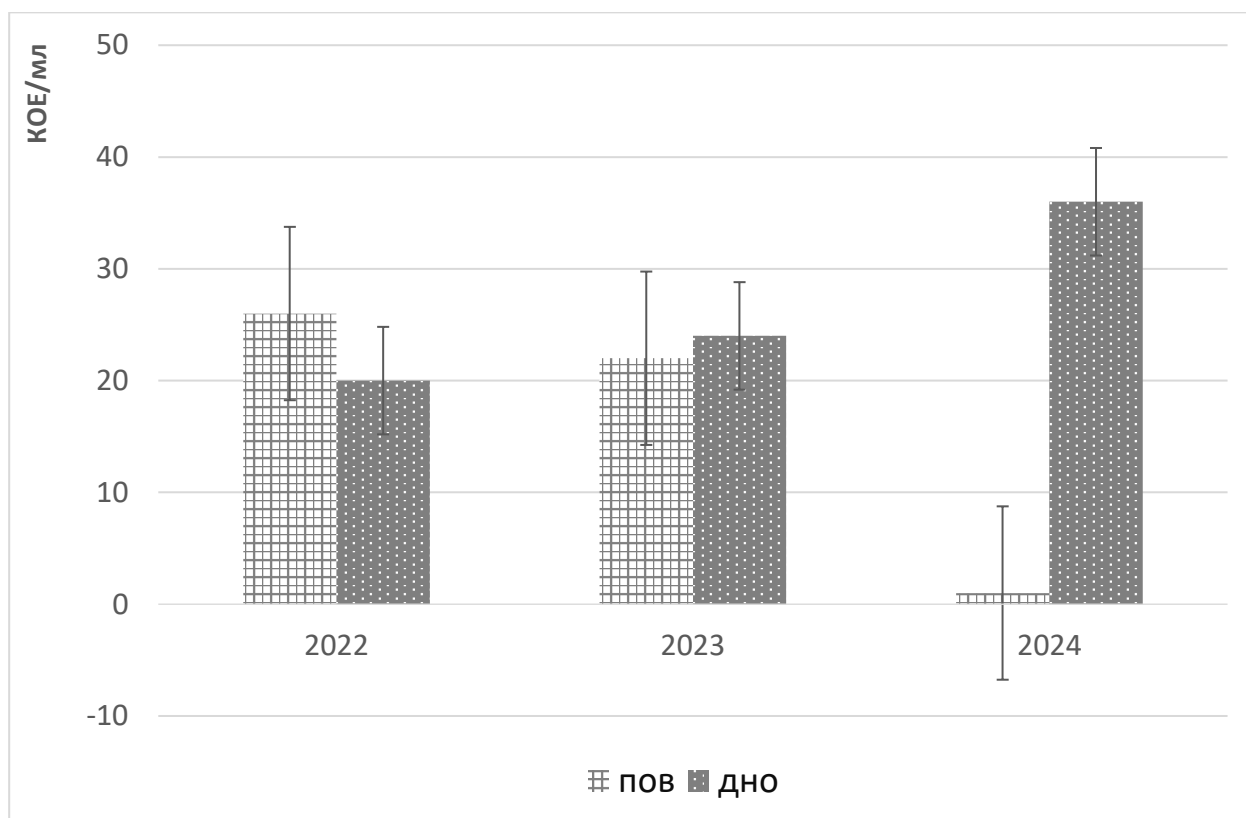


Рис. 3. Сравнительное распределение численности водных грибов (KOE/мл) на ст. 105 в разные годы

Таким образом, можно сказать, что интенсивность развития водных грибов в придонных горизонтах станций в ультрапрофундальной зоне Ладожского озера наблюдается на протяжении нескольких лет. Доминирующий видовой состав относился к одному царству, двум отделам, 4 классам, 5 семействам и 5 видам. Часто встречающимися оказались *Pichia kudriavzevii* Boidin, Pignal & Besson (*Candida krusei* (Castell) Berkhout), *Nakaseomyces glabratus* (H.W. Anderson) Sugita & Takashima (*Torulopsis candida* (Saito) Lodder) и *Rhodotorula rubrum* (Schimon) F.C. Harrison, Nouveau Traité Méd. Массовое развитие дрожжевых организмов привело к вытеснению других представителей микобиоты.

Долгосрочные исследования выявили четкую связь между количеством водных грибов и антропогенной нагрузкой на озеро. В 2013 г. произошла неожиданная вспышка численности микромицетов, сопровождавшаяся сменой доминирующих видов, что, очевидно, было вызвано активным осенним цветением диатомовых водорослей и перестройкой озерной биоты. Снижение внешней фосфорной нагрузки после 1995 г. не привело к немедленному снижению продуктивности озера. Очевидно, что дополнительное количество фосфора, необходимое для поддержания продуктивности фитопланктона, высвобождается деструкторами – бактериопланктоном и водными грибами – из детрита и растворенного органического вещества [24; 28]. Это ускоряет внутренний круговорот фосфора в водоеме. Исследования демонстрируют, что сообщество водных грибов чутко реагирует на изменение нагрузки и участвует в ключевых процессах экосистемы, таких как круговорот питательных веществ.

Благодарности

Автор выражает признательность научному сотруднику лаборатории гидрохимии ИНОЗ РАН – ФИЦ СПб РАН Т.Н. Петровой за плодотворное сотрудничество, ценные советы и обсуждение полученных результатов, старшему научному сотруднику лаборатории географии и гидрологии ИНОЗ РАН – ФИЦ СПб РАН к.г.н. С.Г. Каретникову за помощь и содействие в организации экспедиционных работ.

Работа выполнена по программе НИР FFZF -2024 -0001. «Экосистемы Ладожского озера, водоемов его бассейна и прилегающих территорий в условиях воздействия природных и антропогенных факторов на фоне климатических изменений».

ЛИТЕРАТУРА

1. Петрова Т.Н., Игнатьева Н.В. Биогенные элементы // Ладога / под ред.: В.А. Румянцева, С.А. Кондратьева. СПб., 2013. С. 187–201.
2. Гусаков Б.Л., Тержевик А.Ю. Лимническое районирование и особенности озерных процессов в лимнических зонах // Ладожское озеро – критерии состояния экосистемы. СПб.: Наука, 1992. С. 21–26.
3. Петрова Т.Н., Игнатьева Н.В. Органическое вещество // Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата / под ред.: С.А. Кондратьева, Ш.Р. Позднякова, В.А. Румянцева. М., 2021. С. 258–270.
4. ГОСТ № 31942–2012. Вода. Отбор проб для микробиологического анализа. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200097811> (дата обращения: 24.10.2025).
5. Дудка И.А., Вассер С.П., Элланская И.А. [и др.]. Методы экспериментальной микологии / отв. ред. В.И. Билай. Киев: Наукова думка, 1982. 552 с.
6. Методы почвенной микробиологии и биохимии / под ред. Д.Г. Звягинцева. М.: Изд-во МГУ. 1991. 304 с.
7. Егорова Л.Н. Почвенные грибы Дальнего Востока: гифомицеты / отв. ред. З.М. Азбукина. Л.: Наука. 1986. 192 с.
8. Кураков А.В., Кокаева Л.Ю. Методы изучения разнообразия грибов наземных и водных экосистем. М.: Изд-во Нац. акад. микологии. 2023. 128 с.
9. Самтон Д., Фотергил А., Ринальди М. Определитель патогенных и условно патогенных грибов / пер. с англ. К.Л. Тарасова, Ю.Н. Ковалева; под ред. И.Р. Дорожковой. М.: Мир, 2001. 468 с.
10. Domsch K.H., Gams W., Anderson T.-H. Compendium of soil fungi. THW-Verlag, Eching, 2007. 672 p. ISBN 978-3-930167-69-2
11. Klish M.A. Identification of common *Aspergillus* species. Utrecht, 2002. 116 p.
12. Lodder J. The yeast. A taxonomic study. Amsterdam; North-Holland. 1970. 1358 p.
13. Index Fungorum 2021 – IndexFungorum [Электронный ресурс]. Royal Botanic Garden Kew. URL: <http://indexfungorum.org/names/Names.asp> (дата обращения: 30.01.2021).

14. Власов Д.Ю. Грибные организмы в экстремальных экологических системах: биологическое разнообразие и сущность взаимодействий // Биосфера. 2011. Т. 3, № 4. С. 479–492.
15. Воронин Л.В. Микобиота малых озер тундровой и лесной зон. Ярославль: ЯГПУ. 2010. 155 с.
16. Воронин Л.В., Копытина Н.И. Микобиота отмерших фрагментов тростника, погруженных в воду (Ярославская обл., Россия) // Биология внутренних вод. 2023. № 1. С. 20–27.
17. Исакова Е.А., Корнейкова М.В., Мязин В.А. Численность и видовое разнообразие культивируемых микроскопических грибов побережья Баренцева моря // Микология и фитопатология. 2023. Т. 57, № 4. С. 231–246.
18. Курашов Е.А., Барбаишова М.А., Дудакова Д.С., Капустина Л.Л., Митрукова Г.Г., Русанов А.Г., Алешина Д.Г., Иофина И.В., Протопопова Е.В., Родионова Н.В., Трифонова И.С. Экосистема Ладожского озера: современное состояние и тенденции ее изменения в конце XX – начале XXI века // Биосфера. 2018. Т. 10, № 2. С. 116–121. DOI: 10.24855/BIOSFERA.V.1012.439
19. Черняковская Т.Ф., Воронин Л.В. Распространение грибов-деструкторов растительных субстратов в эвтрофирующемся водоеме // Ярославский педагогический вестник. 2013. Т. 3 (Естественные науки), № 4. С. 161–165.
20. Luo J., Yin J. F., Cai L., Zhang K. Q., Hyde K.D. Freshwater fungi in Lake Diachi, a heavy polluted lake in Yunnan, China // Fungal Diversity. 2004. Vol. 16. P. 93–112.
21. Mazurkiewicz-Zapalowicz K., Wrobel M., Silicki A., Wolska M. Studies on phytopathogenic and saprotrophic fungi in rush associations of Lake Glinno (NW Poland) // Acta Mycologica. 2006. Vol. 41(1). P. 125. DOI: 10.5586/am.2006.016
22. Иофина И.В. Водные грибы // Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата / под ред.: С.А. Кондратьева, Ш.Р. Позднякова, В.А. Румянцева. М., 2021. С. 336–341.
23. Иофина И.В. Современное состояние водной микофлоры Ладожского озера // Российский журнал прикладной экологии. 2022. № 4. С. 77–83. DOI: 10.24852/2411-7374.2022.4.77.83
24. Менишуткин В.В., Петрова Н.А., Иофина И.В., Петрова Т.Н., Сусарева О.М. Ладожское озеро: теория и реальность. СПб: Нестор-История, 2015. 76 с.
25. 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.
26. Петрова Т.Н., Игнатъева Н.В. Биогенные элементы // Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата / под ред.: С.А. Кондратьева, Ш.Р. Позднякова, В.А. Румянцева. М., 2021. С. 270–287.
27. Guseva, M.A., Petrova T.N., Krylova V.Yu. The Modern Hydrochemical Regime of Lake Ladoga as an Indicator of Changes in Its Ecosystem // Water Resources. 2025. Vol. 52, N 2. P. 310–321. DOI: 10.1134/S0097807824605272
28. Петрова Н.А., Расплетина Г.Ф., Трегубова Т.М. [и др.]. Основные этапы изменения озерной экосистемы под влиянием антропогенного эвтрофирования // Ладожское озеро – критерии состояния экосистемы / отв. ред.: Н.А. Петрова, А.Ю. Тержеевик. СПб.: Наука, 1992. С. 240–251.

Поступила в редакцию 01.12.2025 г.
Принята к печати 26.03.2026 г.

Иофина Ирина Викторовна, научный сотрудник, Институт озероведения РАН – ФИЦ РАН; e-mail: irinaio@yandex.ru

Irina V. Iofina, researcher, Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences; e-mail: irinaio@yandex.ru