

УДК 556.55

СОВРЕМЕННЫЙ ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА КАК ИНДИКАТОР ИЗМЕНЕНИЙ В ЕГО ЭКОСИСТЕМЕ¹

© 2025 г. М. А. Гусева^{а, *}, Т. Н. Петрова^б, В. Ю. Крылова^б

^аСанкт-Петербургский филиал «ВНИРО» («ГосНИОРХ» им. Л.С. Берга), Санкт-Петербург, 199004 Россия

^бИнститут озерадения РАН – обособленное структурное подразделение Санкт-Петербургского
Федерального исследовательского центра РАН, Санкт-Петербург, 196105 Россия

*e-mail: velapandere@gmail.com

Поступила в редакцию 29.07.2024 г.

После доработки 30.09.2024 г.

Принята к публикации 28.10.2024 г.

Проанализированы изменения в режиме наиболее тесно связанных с продукционно-деструкционным балансом гидрохимических показателей Ладожского озера – концентрации общего и минерального фосфора, величины водородного показателя и относительного содержания кислорода в воде. Рассмотрены показатели, полученные за период открытой воды в последние 20 лет, в сравнении с предыдущими периодами наблюдений. Отмечено снижение средневзвешенных за период открытой воды концентраций неорганического фосфора в озере как результат практически полного его потребления в гипolimнионе глубоководных зон озера в летний период. Эти изменения лимитируют развитие первичной продукции фитопланктона и сопровождаются снижением средних значений водородного показателя за период открытой воды, что, в свою очередь, косвенно свидетельствует о смещении продукционно-деструкционного баланса в сторону все большего преобладания деструкции органического вещества.

Ключевые слова: кислородный режим, биогенные элементы, фосфор, продукционно-деструкционный баланс, водородный показатель.

DOI: 10.31857/S0321059625020072 EDN: UBWSPO

ВВЕДЕНИЕ

Ладожское озеро – крупнейший водоем Европы, занимающий площадь 18329 км², с объемом водной массы 848 км³. Строение озерной котловины отчетливо разделяет озеро на части – северную глубоководную с максимальной глубиной 230 м и южную значительно более мелководную с глубинами до 30 м. Средняя глубина озера – 51 м. Малая величина отношения стока из озера к объему его водной массы говорит о замедленном водообмене озера и большой консервативности озерной экосистемы [14]. Сложная морфометрия и большие размеры определяют неоднородность гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических процессов в разных частях акватории. По классификации Хатчинсона [30], Ладожское озеро – димиктический

водоем, т. е. полное перемешивание водной толщи происходит дважды в год – весной и осенью. В силу специфического распределения плотности пресной воды термическая неоднородность весной и осенью приводит к формированию термического бара, т. е. зоны с температурой 4°C, близкой к максимальной плотности, от поверхности до дна. Летом по мере прогревания воды на поверхности озера горизонтальная термическая неоднородность сменяется вертикальной стратификацией с образованием хорошо прогретого устойчивого эпилимниона и гипolimниона с температурой, близкой к 4°C, который составляет основную массу воды озера [25]. Термическая неоднородность определяет также распределение в пределах акватории лимнических показателей, в том числе гидрохимических.

Значительная фосфорная нагрузка на озеро, связанная с интенсивной хозяйственной деятельностью на его водосборе в 1970-х гг., привела к антропогенному эвтрофированию водоема и перестройке его экосистемы. За более чем полувековой период исследования Ладожского

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН (тема FFZF-2024-0001 “Экосистемы Ладожского озера, водоемов его бассейна и прилегающих территорий под воздействием природных и антропогенных факторов на фоне климатических изменений”).

озера накоплен огромный по объему материал, характеризующий его гидрохимический режим с момента перехода от олиготрофной стадии развития к мезотрофной до настоящего времени. Результаты многолетних исследований были опубликованы в ряде коллективных монографий [1, 2, 10–12, 14, 22–24].

Наличие длинного многолетнего ряда наблюдений позволяет охарактеризовать изменения, происходящие в гидрохимическом режиме такого большого и инертного водоема, как Ладожское озеро, с периодом полного водообмена 11 лет [12], на современном этапе развития его экосистемы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данной работе использованы результаты регулярных наблюдений за изменениями концентраций общего и минерального фосфора, водородного показателя, абсолютного и относительного содержания кислорода в воде Ладожского озера, непосредственно полученные авторами в период с начала 2000-х гг. по настоящее время, а также литературные данные за более ранний период.

В навигационный период исследования проводились в ходе комплексных рейсов, проведенных в сроки, приуроченные к гидрологическим сезонам весны (май–июнь), лета (июль–август) и осени (сентябрь–октябрь). На рис. 1 показана схема постоянных станций, на каждой из которых в разные сезоны периода открытой воды проводились гидрофизические, гидрохимические и гидробиологические наблюдения от поверхности до дна на стандартных горизонтах с глубинами 0,3, 10, 25, 50, 100, 150 м и в придонном горизонте (в зависимости глубины станции). Постоянная сетка станций позволяет сравнивать полученные в последние годы данные с более ранними архивными и литературными. Также в отдельные периоды были дополнительно исследованы глубоководные северные станции в шхерной зоне озера.

Химический состав воды Ладожского озера и его гидрохимический режим определяются поступлением веществ с водосбора, происходя-

щими в озере гидродинамическими процессами, функционированием озерной биоты. Один из основных факторов, определяющих неоднородность лимнических процессов в разных частях акватории, – морфометрия озерной котловины. В связи с этим на основе морфометрического районирования выделены лимнические зоны, имеющие характерные особенности по целому комплексу озерных характеристик, в том числе гидрохимических; каждая из этих зон играет особую роль в функционировании экосистемы в целом [3].

Сравнительно мелководные прибрежная и деklinальная зоны – в основном области первичного накопления веществ в озере, глубоководные профундальная и ультрапрофундальная – области преобразования этих веществ, вовлечения их в основные круговороты экосистемных процессов и консервации.

Глубоководные зоны с глубинами > 52 м (рис. 1) представляют собой основную водную массу озера, самую консервативную его область. Их объем составляет ~80% объема озера, благода-

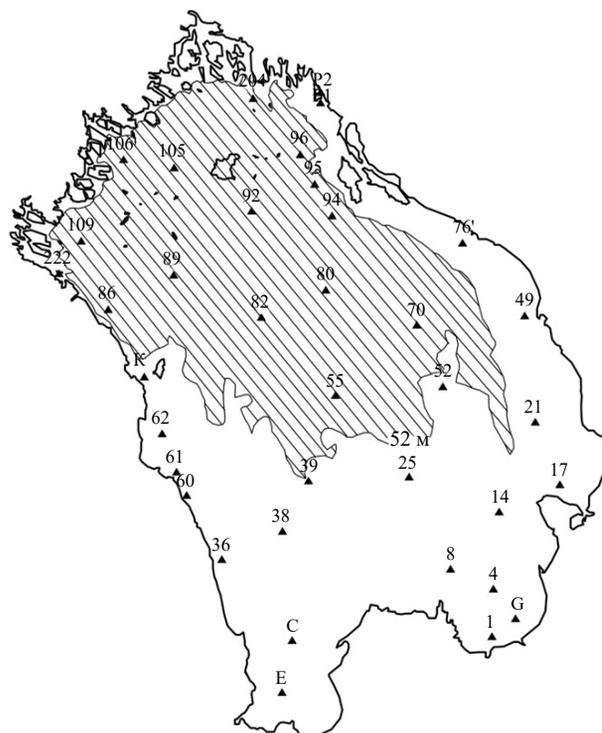


Рис. 1. Картограмма расположения станций отбора проб глубоководных (> 52 м) зон Ладожского озера.

ря чему величины гидрохимических показателей в этих зонах определяют гидрохимические характеристики и трофический статус всего озера.

Концентрации форм фосфора в воде определялись в соответствии с методиками, разработанными Союзом стандартизации Финляндии (SFS): неорганический фосфор (IP) – спектрофотометрическим модифицированным молибдатным методом Мерфи и Райли с использованием аскорбиновой кислоты в качестве окислителя (SFS 3025); общий фосфор (TP) – окислением органических соединений фосфора персульфатом калия в присутствии серной кислоты с последующим определением фосфатов (SFS 3026). Концентрация кислорода была определена йодометрическим титрованием по методу Винклера [21].

Средние для озера концентрации общего и неорганического (минерального) фосфора рассчитывались как средневзвешенные с учетом объемов лимнических зон. Схемы пространственного распределения этих показателей построены с использованием средневзвешенных по глубине значений для каждой станции. Пространственные схемы распределения водородного показателя и насыщения кислородом составлены послойно (поверхность и дно), так как средневзвешенные их значения малоинформативны – кислород продуцируется в эвфотическом слое, потребляется по всему столбу воды, однако из-за большого объема холодноводного гипolimниона, большой глубины озера и полного перемешивания водной массы в весенний и осенний периоды насыщение кислородом в толще воды определяется преимущественно гидрофизическими факторами и близко к 100%. Изменчивость в эвфотической и придонной зонах намного более показательна. То же касается водородного показателя, связанного с кислородным режимом и соотношениями продукционных и деструкционных процессов в воде.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

С позиции продукционно-деструкционных соотношений в экосистеме две мелководные зоны (прибрежная и деклинальная) и летний эпилимнион глубоководных зон представляют

собой преимущественно трофогенную, а озерный гипolimнион – трофолитическую области озерной водной массы. Преобладание трофолитической области над трофогенной определяет доминирование процессов минерализации органического вещества в экосистеме над образованием [13, 22]. Изменение лимнических характеристик водной массы глубоководных зон может привести к необратимой деградации экосистемы озера. Далее будут рассматриваться изменения гидрохимических показателей, происходящие в этих наиболее консервативных зонах, так как они наиболее важные для экосистемы озера.

Биологическую продуктивность водоема лимитирует содержание биогенных элементов, в первую очередь азота и фосфора. Весовое соотношение этих элементов в основной водной массе Ладожского озера значительно превышает 40, за исключением южной мелководной зоны (глубина 6 м) в устье р. Сясь, гидрохимический режим которой полностью определяется составом первичной водной массы, и ряда прибрежных областей в северной шхерной части озера, испытывающих значительную антропогенную нагрузку. В соответствии со стехиометрической моделью Редфилда–Ричардса для фитопланктона весовое соотношение между азотом и фосфором составляет 7 : 1 [33].

Совместное колимитирование продукции и азотом, и фосфором обсуждается в большом количестве работ, однако на экспериментальных данных [27] показано, что в случае низких концентраций биогенных элементов действует закон Либиха и, следовательно, возможно выделить один лимитирующий фактор – как правило, в олиготрофных водоемах таким фактором является фосфор. По оценке [34], в водоемах при $N : P < 10$ наблюдается дефицит азота, > 17 – фосфора. В монографии [5] по более чем десятку источников обобщены оптимальные для развития фитопланктона соотношения азота к фосфору: соотношение по различным данным меняется от 7 до 45, но в большинстве случаев оно ≤ 20 . На примере разнотипных водоемов за 10-летний период исследований в [29] показано, что и в морских, и в пресноводных системах при весовом соотношении $TN : TP > 22$ лимитирующий фактор для роста продукции – фосфор.

В Ладожском озере средневзвешенные концентрации общего азота за период открытой воды с 1976 г. по настоящее время меняются в пределах 540–760 мкг/л [15]. Эти значения в десятки раз превышают средневзвешенное содержание фосфора, и в первую очередь именно фосфор лимитирует продукционные процессы в основной водной массе Ладожского озера, характеристики которой рассматриваются в работе. Поэтому в дальнейшем будет обсуждаться в первую очередь изменение содержания минерального и общего фосфора и его влияние на внутриводоемные процессы.

Максимальные за период наблюдений концентрации общего фосфора (30 мкг Р/л) отмечались в 1970-е гг., что напрямую связано с увеличением его поступления в результате интенсификации хозяйственной деятельности на водосборе. В дальнейшем в результате снижения поступления фосфора уменьшилась и концентрация его в водоеме. В 1980 г. ее среднее значение составляло 27 мкг Р/л, в 1981–

1984 гг. – 23–24, в 1988–1992 гг. – 20–21, в 1992–2002 гг. – 16–22 мкг Р/л [15].

С 2003 по 2019 г. наблюдался период низкого содержания общего фосфора в озере, средние за период открытой воды концентрации в эти годы не превышали рассчитанную ранее [16] допустимую для озера концентрацию (15 мкг Р/л) и составляли 11–14 мкг Р/л. В отдельные годы (2007, 2009, 2011, 2013 гг.) его средняя концентрация опускается до 11 мкг Р/л, что остается минимальной величиной для периода наблюдений с 1976 г. и приближается к характерной для олиготрофной стадии развития озера (1959–1962 гг.) [15]. С 2020 г. этот показатель увеличился до 18–20 мкг Р/л и впервые с начала 2000-х гг. превысил допустимую для озера величину. На рис. 2 представлено пространственное распределение средних летних концентраций общего фосфора за периоды 2013–2018 гг. (а) и 2019–2023 гг. (б). Характерные черты его пространственно-временного распределения по акватории во все годы сохраняются, однако средняя кон-

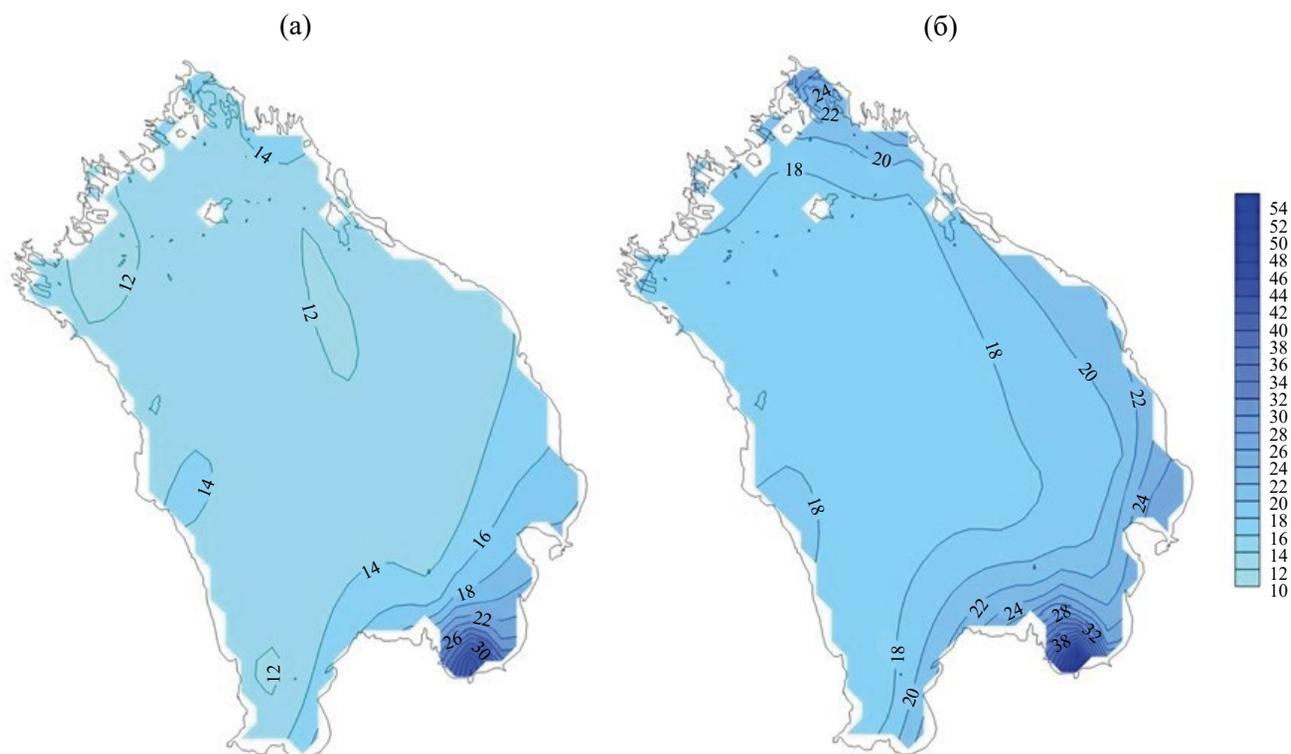


Рис. 2. Пространственное распределение средних летних концентраций общего фосфора за 2013–2018 гг. (а) и 2019–2023 гг. (б).

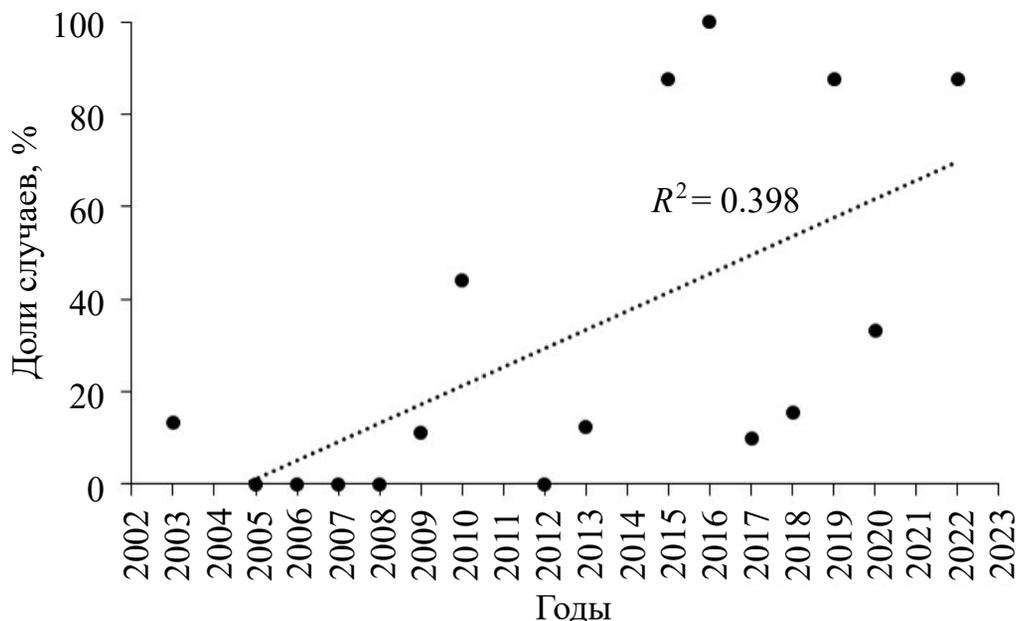


Рис. 3. Доли случаев (% от общего числа измерений) с концентрацией $P_{\text{мин}} < 0.05$ мкг Р/л в гипolimнионе глубоководной зоны Ладожского озера в летний период.

центрация за 2019–2023 гг. выше, чем в 2013–2018 гг., на 5.4 мкг Р/л.

Наиболее доступная для потребления биотой формой фосфора – неорганический (минеральный) фосфор [28]. Средняя за период открытой воды концентрация неорганического фосфора в озере в 1976–1989 гг. составляла 11 мкг Р/л. К 1998 г. происходит плавное снижение средней концентрации неорганического фосфора с 9 до 5 мкг Р/л [19], с 2000 по 2012 г. средние за период открытой воды концентрации минерального фосфора ≤ 5 мкг Р/л [12], особенно низкие значения (< 2 мкг Р/л) встречались в 2015–2023 гг. Несмотря на некоторое увеличение содержания общего фосфора в озере в 2020–2023 гг., увеличения средних за период открытой воды концентраций минерального фосфора в воде Ладожского озера не произошло. На протяжении всего периода наблюдений отмечен отчетливый тренд снижения его средних концентраций в воде Ладожского озера.

Летом 2010 г. впервые заметно проявился процесс практически полного потребления ми-

нерального фосфора не только в воде прибрежной зоны и в эпилимнионе, но и в гипolimнионе глубоководных зон озера. В дальнейшем случаи, когда концентрация минерального фосфора оказывались ниже предела обнаружения (5 мкг/л), в гипolimнионе озера стали наблюдаться чаще. В 2016 г. впервые за все время наблюдений с 1976 г. концентрация минерального фосфора в гипolimнионе в 100% случаев оказалась ниже предела обнаружения, в 2015, 2019 и 2022 гг. значения ниже аналитического нуля наблюдались в 90% случаев (рис. 3).

Об изменении соотношения продукционно-деструкционных процессов в озере, связанных с уменьшением содержания минерального фосфора, косвенно можно судить по изменению величины водородного показателя воды озера, которое наблюдается в последние годы.

В олиготрофный период развития Ладожского озера водородный показатель менялся в пределах 7.0–8.0, в отдельных случаях достигая 8.2–8.3. К 1980 г. увеличение фотосинтетической деятельности фитопланктона привело к росту верхней

границы величины водородного показателя до 9.5, в то время как минимальные значения остались на прежнем уровне – 7.1–7.3 [18]. В 2003–2013 гг. минимальные значения опускаются до 6.1–6.3, максимальные остаются на уровне 8.9–9.0. Начиная с 2016 г. в озере наблюдается постепенное снижение водородного показателя. Летом, в период развития фитопланктона, минимальные значения водородного показателя оставались на том же низком уровне, что и в 2003–2013 гг., а максимальная величина была ≤ 7.8 и только в 2020 г. в отдельных случаях доходила до 8.0. Статистические характеристики (диапазон изменений, медиана, 25 и 75 процентиля) измеренных значений водородного показателя в Ладожском озере по сезонам за 2003–2023 гг. представлены на рис. 4.

Распределение водородного показателя по акватории в летний и осенний сезоны в 2016–2023 гг. отличается от характерных сезонных распределений за период 2003–2013 гг. [12] в сторону более низких значений, общие пространственные закономерности сохраняются. На рис. 5 и 6 представлены средние распределения значений водородного показателя в Ладожском озере в поверхностном и придонном слоях в летний и осенний периоды 2013–2018 и 2019–2023 гг. соответственно.

На олиготрофной стадии развития озера относительное содержание растворенного кислорода в глубоководной части по всему столбу воды было близко к 100%, при этом в трофогенном слое оно было $\leq 120\%$, что обусловлено как процессами фотосинтеза, так и явлением гистерезиса при быстром прогреве воды. В гипolimнионе в течение всего лета относительное содержание кислорода не было ниже 95%, т. е. биохимические процессы деструкции органического вещества не играли заметной роли в расходовании растворенного кислорода [20]. К концу 1970-х гг. происходит перестройка озерной экосистемы от олиготрофного состояния к мезотрофному. Однако, несмотря на увеличение продуктивности, кислородный режим озера еще оставался близким к наблюдавшемуся в 1960-х гг. В весенние и летние периоды интенсивного фотосинтеза в трофогенном слое относительное содержание кислорода могло достигать 120–130% насыщения, что на 10–20% больше, чем в предыдущий

период. В гипolimнионе глубоководных зон в придонных горизонтах относительное содержание кислорода снижалось до 85–95%, что свидетельствует об интенсификации процессов деструкции органического вещества [18]. С начала 1980-х гг. на кислородном режиме озера начали отражаться внутриводоемные процессы, связанные с трансформацией органического вещества. Весной в теплоинертной области относительное содержание кислорода в поверхностном слое воды снижалось до 90% насыщения и менее, что ранее не наблюдалось. Летом относительное содержание кислорода в поверхностных слоях воды могло достигать 130–135%, сопровождаясь высокими значениями рН – 8.6–9.3. В этот период впервые было отмечено летнее снижение относительного содержания кислорода до 85% в придонном горизонте по линии прохождения 30-метровой изобаты [26]. С 1990-х гг. и по настоящее время в той или иной степени продолжают проявляться особенности кислородного режима Ладожского озера, которые впервые появились в течение 1980-х гг. Однако с 1990-х гг. даже при активном фотосинтезе насыщение поверхностных слоев воды кислородом незначительно $> 100\%$, обычно не более чем на 5–7%.

С 2016 г. содержание кислорода в поверхностном слое воды в летний сезон все чаще остается $< 100\%$ насыщения на значительной части акватории. Если летом в 2017 и 2018 гг. на отдельных станциях в глубоководной зоне озера наблюдалось пересыщение поверхностного слоя воды кислородом, то в летние периоды 2022 и 2023 гг. по всей акватории его относительное содержание в поверхностном слое воды было $\leq 94\%$, осенью содержание кислорода в поверхностном слое составляло 90–94% в 2022 г. и 88–90% в 2023 г. (рис. 7). В слое гипolimниона этот показатель может опускаться до 83–89%, что говорит об увеличении деструкции органического вещества в придонных горизонтах. На рис. 8 и 9 представлены распределения средних значений относительного содержания кислорода в Ладожском озере в поверхностном и придонном слоях в летний и осенний периоды 2013–2018 и 2019–2023 гг., соответственно.

С 2003 до 2007 г. в летний период доля (%) общего количества измерений с концентрацией

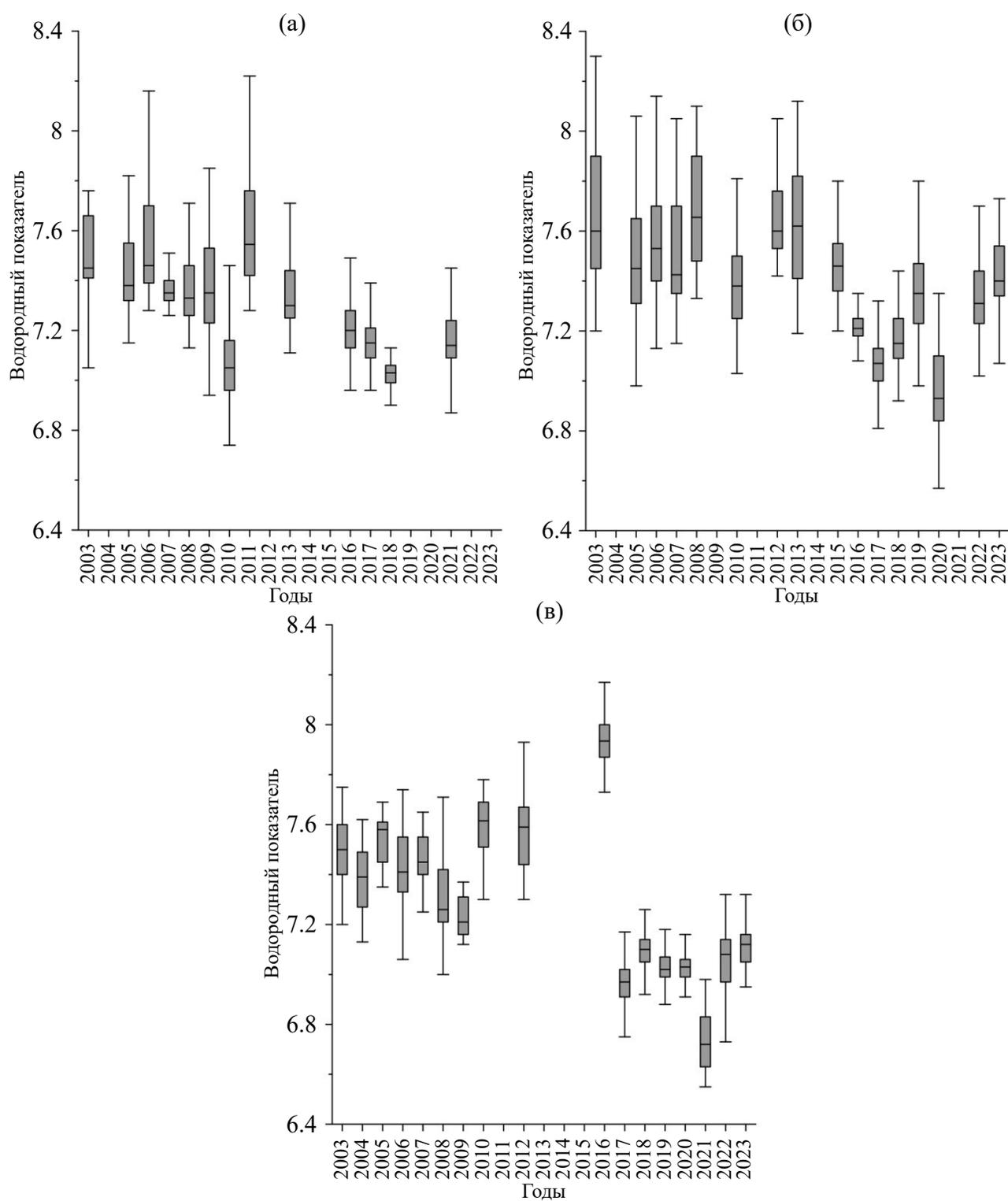


Рис. 4. Диаграммы размаха измеренных значений водородного показателя в Ладожском озере за 2003–2023 гг. в весенний (а), летний (б) и осенний (в) сезоны.

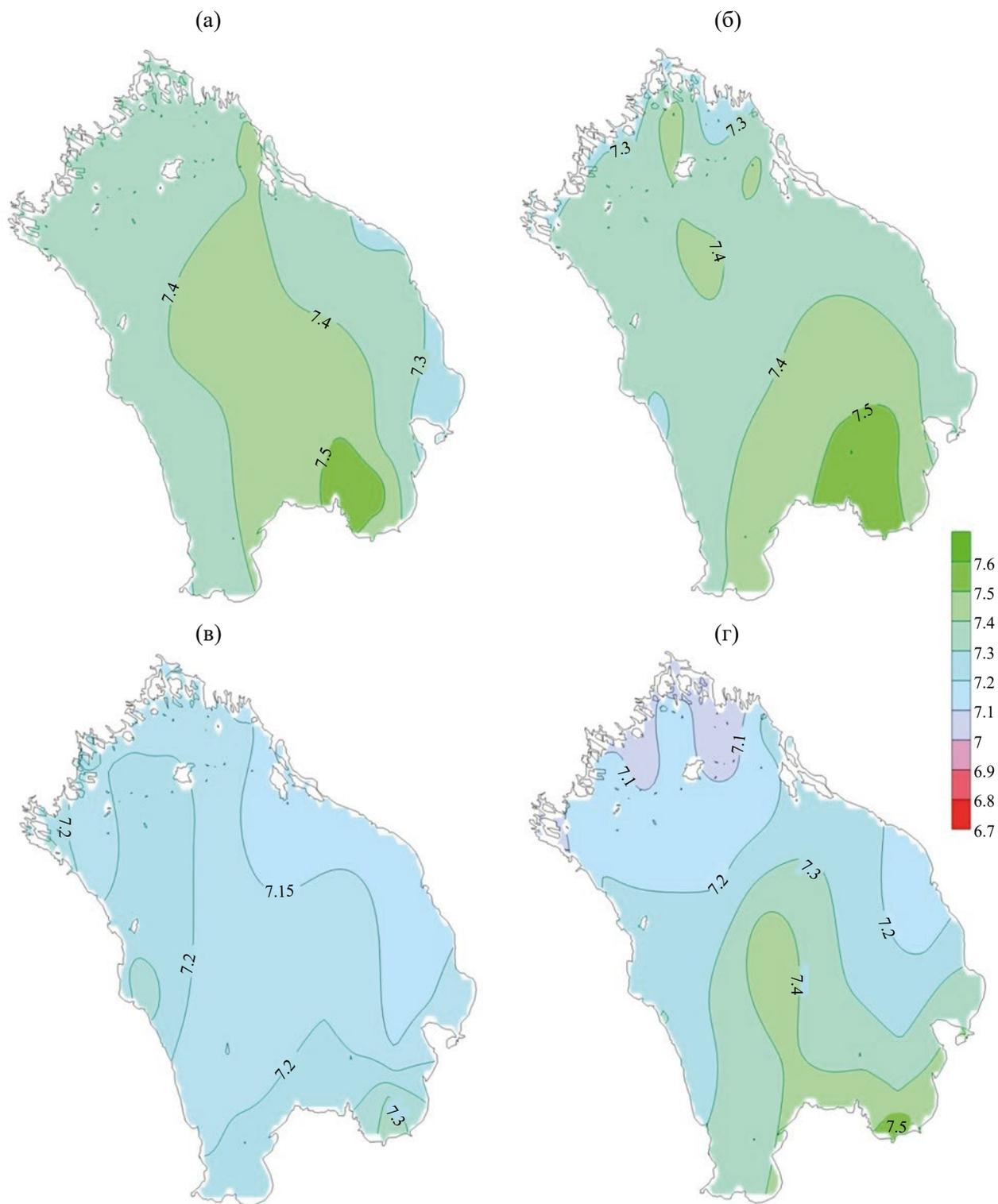


Рис. 5. Распределение средних значений водородного показателя в Ладожском озере в летний период 2013–2018 гг. в поверхностном (а) и придонном (в) слоях и 2019–2023 гг. в поверхностном (б) и придонном (г) слоях.

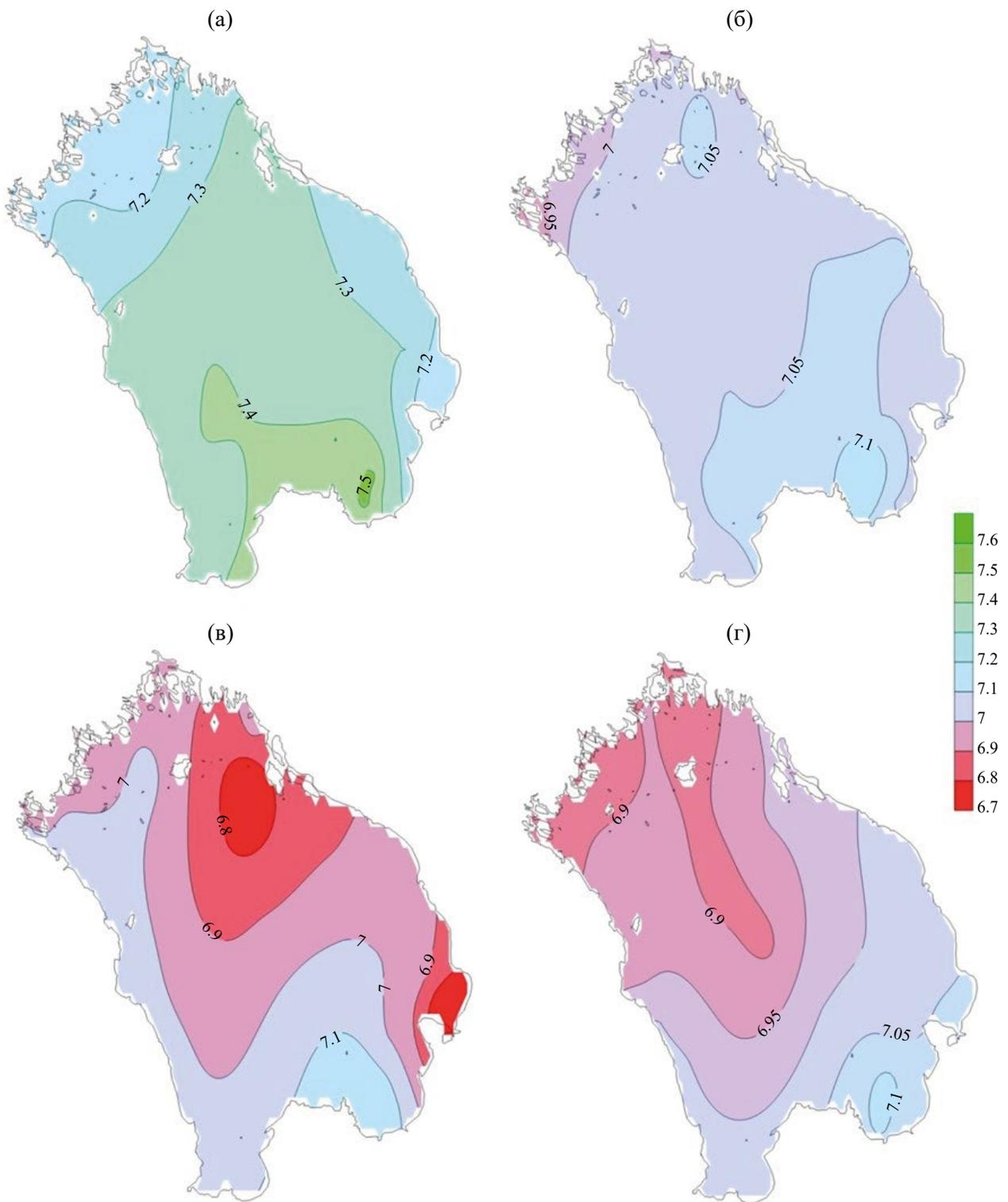


Рис. 6. Распределение средних значений водородного показателя в Ладожском озере в осенний период 2013–2018 гг. в поверхностном (а) и придонном (в) слоях и 2019–2023 гг. в поверхностном (б) и придонном (г) слоях.

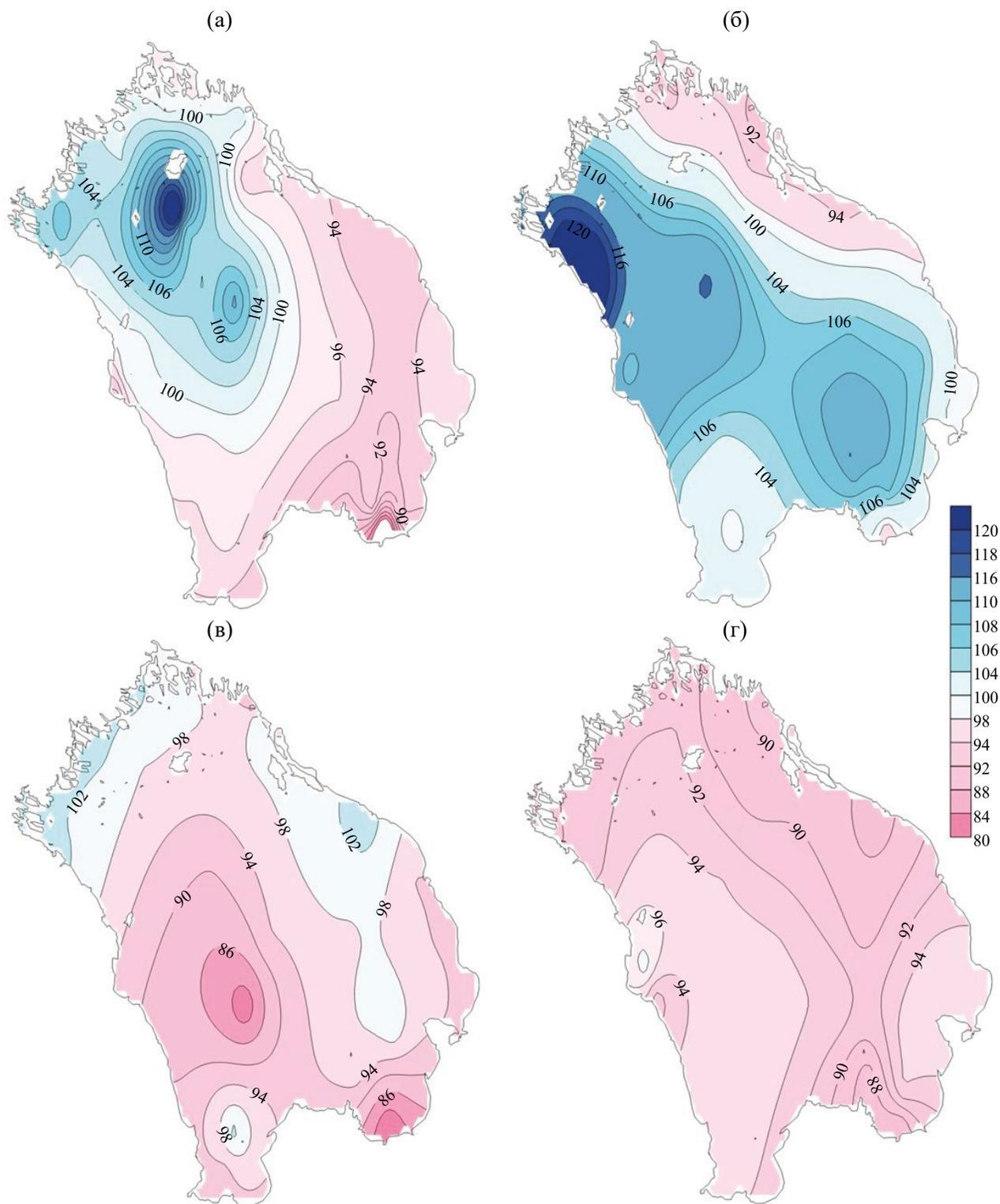


Рис. 7. Летнее распределение относительного содержания кислорода (% насыщения) в поверхностном слое воды Ладожского озера в 2017 (а), 2018 (б), 2022 (в) и 2023 (г) гг.

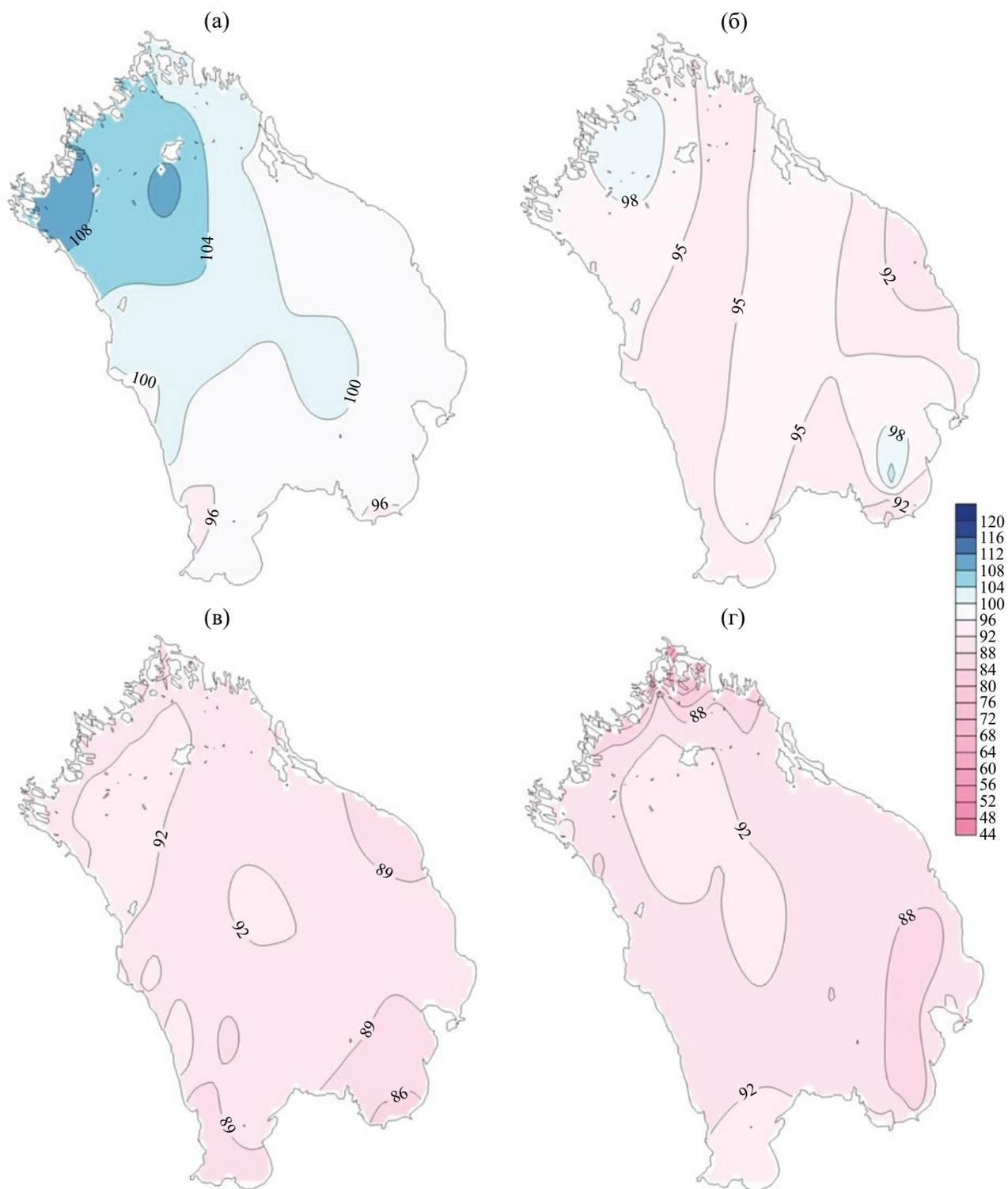


Рис. 8. Распределение средних значений относительного содержания кислорода (% насыщения) в Ладожском озере в летний период 2013–2018 гг. в поверхностном (а) и придонном (в) слоях и 2019–2023 гг. в поверхностном (б) и придонном (г) слоях.

СОВРЕМЕННЫЙ ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА...

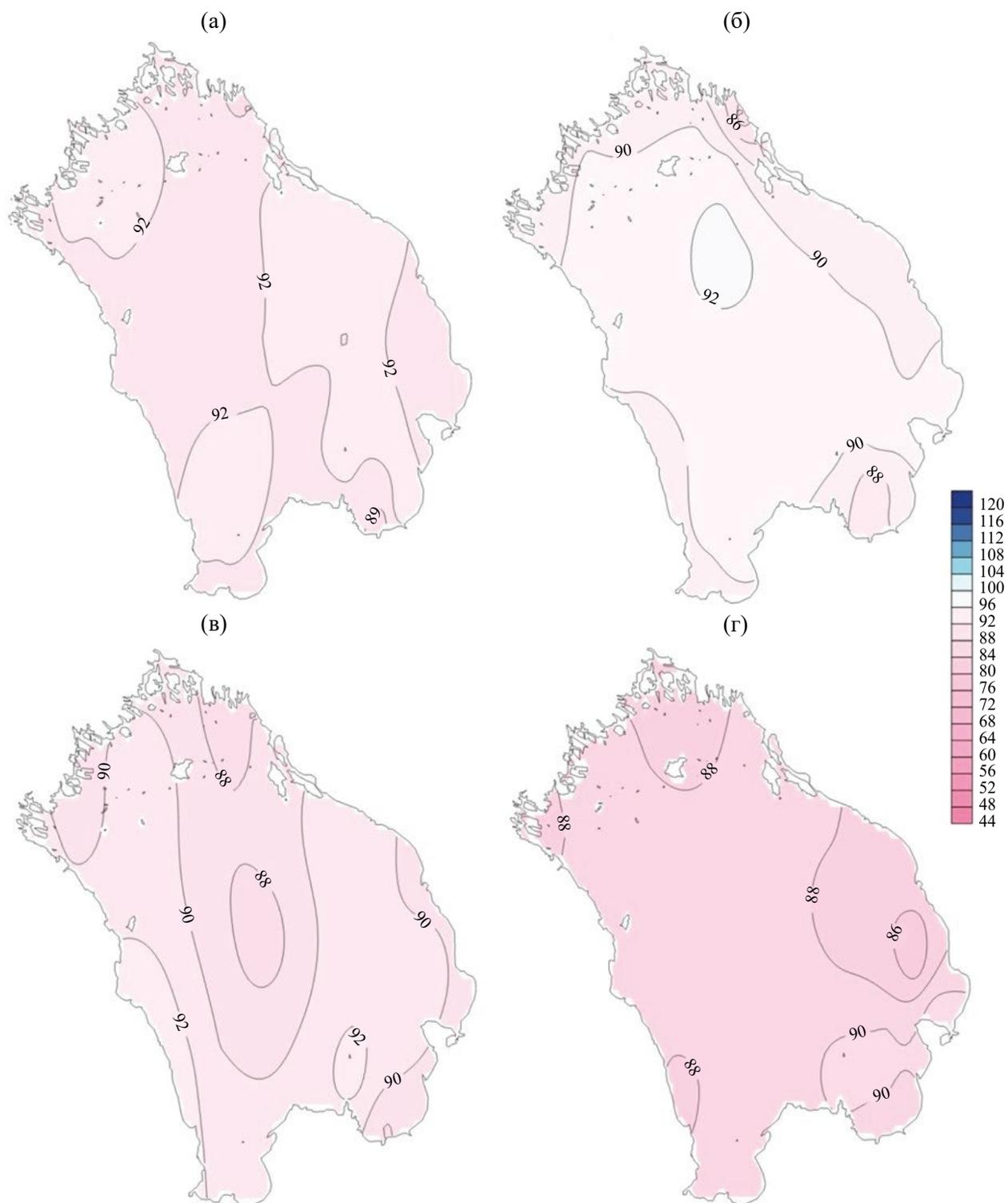


Рис. 9. Распределение средних значений относительного содержания кислорода (% насыщения) в Ладожском озере в осенний период 2013–2018 гг. в поверхностном (а) и придонном (в) слоях и 2019–2023 гг. в поверхностном (б) и придонном (г) слоях.

кислорода > 100% насыщения в поверхностном слое воды Ладожского озера возрастала, но после 2008 г. этот показатель в озере заметно снижался (рис. 10).

При этом средняя относительная концентрация кислорода в воде озера меняется незначительно. Вследствие того, что достаточно большой запас кислорода содержится в гипolimнионе основной массы озера, а также благодаря термической циркуляции, проходящей два раза в год в весенний и летний период, общий запас кислорода поддерживается в водной массе на уровне, близком к 100% насыщения. Только в период летней стратификации фиксируется увеличение частоты случаев локального дефицита кислорода в приповерхностном слое.

Организмы-деструкторы испытывают в наибольшей степени дефицит фосфора как его основные потребители. Фитопланктон в ограниченных пределах способен адаптироваться к изменению содержания фосфатов, изменяя состав своих клеточных мембран [35]. Но также активность и бактериопланктона, и водных гри-

бов способна при дефиците фосфора пополнять его запас, вовлекая в деструкцию часть консервативной высокомолекулярной фракции органического вещества [6–9, 13].

По данным [31], в Ладожском озере в период 2016–2019 гг. произошла стабилизация концентрации бактериопланктона на более высоком по сравнению с предыдущим десятилетием уровне. С 2016 г. отмечены изменения качественного состава водных грибов, смена доминирующего комплекса и увеличение их численности [4]. В составе фитопланктона на протяжении последних 30 лет наблюдается увеличение популяции криптофитовых водорослей [17]. Развитие этих организмов интенсифицируется благодаря их способности получать биогенные элементы благодаря миксотрофному типу питания и подвижности [32]. Таким образом, наблюдаемые после 2016 г. частое снижение концентрации минерального фосфора в гипolimнионе до аналитического нуля и увеличение дефицита кислорода в придонном горизонте сопровождаются изменениями количественного и качественного состава фито-, бактерио- и микопланктона.

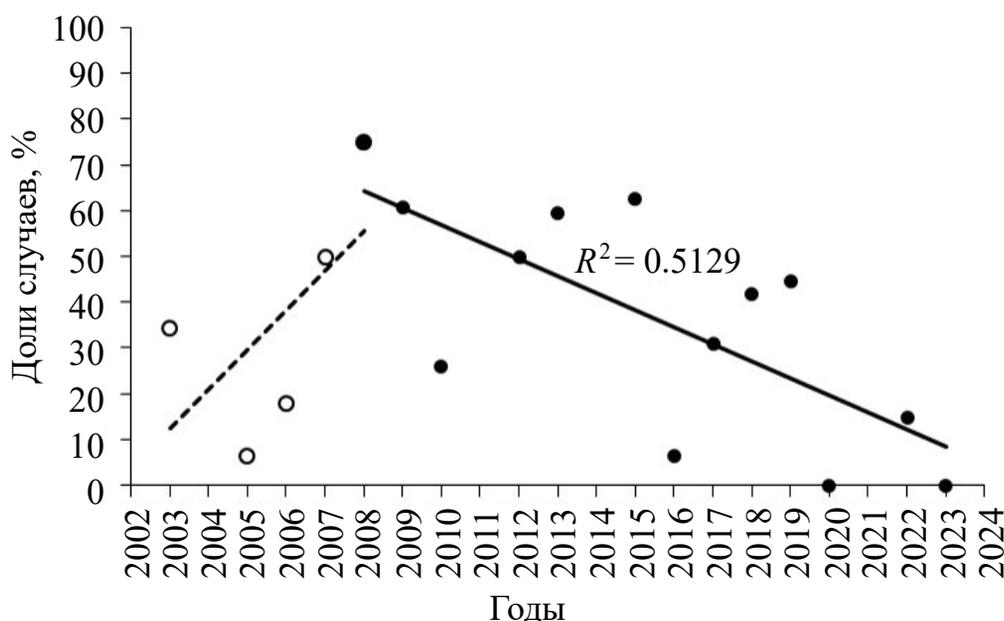


Рис. 10. Доли случаев (% общего числа измерений) с концентрацией кислорода >100% насыщения в поверхностном слое воды Ладожского озера в летний период.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ многолетних данных показал существенные изменения в режиме наиболее тесно связанных с продукционно-деструкционным балансом гидрохимических показателей Ладожского озера — общего и минерального фосфора, величины водородного показателя и относительного содержания кислорода в воде Ладожского озера, произошедшие в последние годы. Значительные изменения были зафиксированы как в эпилимнионе, так и в гиполимнионе глубоководной зоны, которая представляет собой основную водную массу озера, его самую консервативную область. Благодаря большому объему водной массы этой зоны, величины гидрохимических показателей здесь определяют гидрохимические характеристики и трофический статус всего озера.

В 2015–2023 гг. отмечается практически полное потребление неорганического фосфора в гиполимнионе глубоководных зон озера в летний период. Такие ситуации в предыдущий период исследований практически никогда не наблюдались. В результате этого происходит снижение средневзвешенных за период открытой воды концентраций фосфатов в озере до очень низких значений (< 2 мкг P/л). Несмотря на некоторое увеличение содержания общего фосфора в озере в 2020–2023 гг., увеличения средних за период открытой воды концентраций минерального фосфора в воде Ладожского озера не произошло.

В эти же годы несколько снизились величины водородного показателя и сузился их диапазон. Распределение значений водородного показателя по акватории в летний и осенний сезоны в 2016–2023 гг. отличается от характерных сезонных распределений в период 2003–2013 гг. в сторону более низких значений.

После 2016 г. содержание кислорода в поверхностном слое воды в летний сезон все чаще остается $< 100\%$ насыщения на значительной части акватории. В летние периоды 2020 и 2022 гг. оно впервые было $< 96\%$ насыщения по всему озеру.

Приведенные данные показывают, что в последние годы интенсивность потребления ми-

нерального фосфора растет и его заметный дефицит может ограничивать продуктивность фитопланктона в трофогенном слое. Снижение значений водородного показателя свидетельствует о смещении продукционно-деструкционного баланса в сторону увеличения деструкции. Рост температуры воды интенсифицирует все биологические процессы, но не приводит к значительному росту продуктивности Ладожского озера из-за нехватки легкодоступных форм фосфора, в то время как процессы биохимического окисления как автохтонного, так и аллохтонного органического вещества могут ускоряться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера / Под ред. *Н.А. Петровой*. Л.: Наука, 1982. 304 с.
2. Гидрохимия и гидрооптика Ладожского озера. Л.: Наука, 1967. 216 с.
3. *Гусаков Б.Л., Тержевик А.Ю.* Лимническое районирование и особенности озерных процессов в лимнических зонах // Ладожское озеро — критерии состояния экосистемы / Под ред. *Н.А. Петровой, А.Ю. Тержевика*. СПб.: Наука, 1992. С. 21–26.
4. *Иофина И.В.* Современное состояние водной микрофлоры Ладожского озера // Рос. журн. приклад. экологии. 2022. № 4. С. 77–83.
5. *Китаев С.П.* Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 395 с.
6. *Коркишко Н.Н., Кулиш Т.П., Крылова Ю.В., Петрова Т.Н.* Трансформация органического вещества воды Ладожского озера в условиях антропогенного эвтрофирования // Экол. химия. 1995. Т. 4. № 4. С. 288–295.
7. *Коркишко Н.Н., Кулиш Т.П., Петрова Т.Н., Черных О.А.* Водное гуминовое вещество в воде озера и процесс его трансформации // Ладожское озеро — прошлое, настоящее, будущее / Под ред. *В.А. Румянцевой, В.Г. Дробковой*. СПб.: Наука, 2002. С. 111–116.
8. *Коркишко Н.Н., Кулиш Т.П., Петрова Т.Н., Черных О.А.* Органическое вещество воды Ладожского озера // Ладожское озеро / Под ред. *Н.Н. Филатова*. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. С. 105–110.
9. *Коркишко Н.Н., Кулиш Т.П., Петрова Т.Н., Черных О.А.* Органическое вещество в воде Ладожского озера и процессы его трансформации // Экол. химия. 2000. Т. 9. № 4. С. 221–229.

10. Ладожское озеро – критерии состояния экосистемы / Под ред. *Н.А. Петровой, А.Ю. Терзевича*. СПб.: Наука, 1992. 328 с.
11. Ладожское озеро – прошлое, настоящее, будущее / Под ред. *В.А. Румянцева, В.Г. Дробковой*. СПб.: Наука, 2002. 327 с.
12. Ладога / Под ред. *В.А. Румянцева, С.А. Кондратьева*. СПб.: Нестор-История, 2013. 468 с.
13. *Меншуткин 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.
14. Общая характеристика озера / Ладожское озеро и достопримечательности его побережья. Атлас // Под ред. *В.А. Румянцева*. СПб.: Нестор-История, 2015. С. 15–18.
15. *Петрова Т.Н., Игнатьева 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.: РАН, 2021. С.2 70–287.
16. *Петрова Н.А., Расплетина Г.Ф., Трегубова Т.М., Капустина Л.Л., Иофина И.В., Кулиш Т.П., Юдин Е.А.* Основные этапы изменения озерной экосистемы под влиянием антропогенного эвтрофирования // Ладожское озеро – критерии состояния экосистемы / Под ред. *Н.А. Петровой, А.Ю. Терзевича*. СПб.: Наука, 1992. С. 240–251.
17. *Протопопова Е.В.* Фитопланктон // 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.: РАН, 2021. С. 300–310.
18. *Расплетина Г.Ф.* Кислородный режим, величина рН, содержание органического вещества // Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера. Л.: Наука, 1982. С. 101–105.
19. *Расплетина Г.Ф., Сусарева О.М.* Биогенные элементы // Ладожское озеро – прошлое, настоящее, будущее / Под ред. *В.А. Румянцева, В.Г. Дробковой*. СПб.: Наука, 2002. С.77–86.
20. *Расплетина Г.Ф., Ульянова Д.С., Шерман Э.Э.* Гидрохимия Ладожского озера // Гидрохимия и гидрооптика Ладожского озера. Л., 1967. С. 60–122.
21. РД 52.24.419-95 Методические указания. Методика выполнения измерений массовой концентрации растворенного кислорода в водах титриметрическим методом.
22. 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.: РАН, 2021. 637 с.
23. Современное состояние экосистемы Ладожского озера / Под ред. *Н.А. Петровой, Г.Ф. Расплетиной*. Л.: Наука, 1987. 213 с.
24. *Сусарева О.М., Петрова Т.Н.* Многолетний мониторинг динамики содержания фосфора в Ладожском озере // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах. Материалы V Всесоюз. симпоз. с международ. участием. Петрозаводск, 2012. С. 62–66.
25. *Тихомиров А.И.* Термика крупных озер. Л.: Наука, 1982. 232 с.
26. *Трегубова Т.М., Кулиш Т.П.* Потребление кислорода в гипolimнионе как итог процесса антропогенного эвтрофирования // Современное состояние экосистемы Ладожского озера / Под ред. *Н.А. Петровой, Г.Ф. Расплетиной*. Л.: Наука, 1987. С. 172–179.
27. *Chorus I., Spijkerman E.* What Colin Reynolds could tell us about nutrient limitation, N:P ratios and eutrophication control // *Hydrobiologia*. 2021. V. 848. P. 95–111. <https://doi.org/10.1007/s10750-020-04377-w>
28. *Correll D.L.* The Role of Phosphorus in the Eutrophication of Receiving Waters: A Review // *J. Environ. Quality*. 1998. V. 27. № 2. P. 261–266. <https://doi.org/10.2134/jeq1998.00472425002700020004x>
29. *Guildford S.J., Hecky R.E.* Total nitrogen, total phosphorus, and nutrient limitation in lakes and oceans: Is there a common relationship? // *Limnol. Oceanogr.* 2000. V. 45. № 6. P. 1213–1223. <https://doi.org/10.4319/lo.2000.45.6.1213>
30. *Hutchinson G.E., Loffler H.* The thermal classification of lakes // *Proc. Nat. Acad. Sci.* 1956. V. 42. P. 84–86. <https://doi.org/10.1073/pnas.42.2.84>
31. *Kapustina L.L., Mitrukova G.G.* Current state of bacterial community of Lake Ladoga // *Limnol. Rev.* 2021. V. 21. № 3. P. 155–164. <https://doi.org/10.2478/limre-2021-0014>
32. *Klaveness D.* Ecology of the Cryptomonadida: a first review // Growth and reproductive strategies of freshwater phytoplankton / Ed. *C.D. Sandgren*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1988. P. 105–133.
33. *Redfield A.C.* On the proportions of organic derivatives in sea water and their relation to the composition of plankton // James Johnstone Memorial Volume. Liverpool: Univ. Press, 1934. P. 176–192.

34. *Smith V.H.* The nitrogen and phosphorus dependence of algal biomass in lakes: An empirical and theoretical analysis // *Limnol. Oceanogr.* 1982. V. 27. № 6. P. 1101–1112. <https://doi.org/10.4319/LO.1982.27.6.1101>
35. *Van Mooy B.A., Fredricks H.F., Pedler B.S., Dyhrman S.T., Karl D.M., Koblizek M., Lomas M.W., Mincer T.J., Moore L.R., Moutin T., Rappe M., Webb E.A.* Phytoplankton in the ocean use non-phosphorus lipids in response to phosphorus scarcity // *Nature.* 2009. V. 458. P. 69–72. <https://doi.org/10.1038/nature07659>

The current hydrochemical regime of Lake Ladoga as an indicator of changes of its ecosystem

M. A. Guseva^{a,*}, T. N. Petrova^b, V. Yu. Krylova^b

^a *St. Petersburg Branch of “VNIRO” (“GosNOIRH” named after L.S. Berg), Saint Petersburg, 199053 Russia*

^b *Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 196105 Russia*

**e-mail: velapandere@gmail.com*

The changes in the regime of the most related to the balance of production and destruction of Lake Ladoga hydrochemical indicators were analyzed: the content of total and mineral phosphorus, pH and the oxygen concentration in water. The results obtained during the open water period over the last 20 years are compared with the modern period. A decrease in the average inorganic phosphorus concentration in the lake during the open water period is noted, as a result of its almost complete consumption in the hypolimnion of the deep-water zones of the lake in summer. These changes limit the phytoplankton primary production and are accompanied by a decrease in the average pH in the open water period, which in turn is expressed in a shift in the production-destruction balance towards an increasing predominance of the process of organic matter destruction.

Keywords: oxygen regime, biogenic elements, phosphorus, pH.