

БИОЛОГИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ**BIOLOGICAL RESOURCES****БІЯЛАГІЧНЫЯ РЭСУРСЫ**

ISSN 1810-9810 (Print)
УДК 574.58

Б. В. Адамович, Т. М. Михеева, Р. З. Ковалевская, Т. В. Жукова, Н. В. Дубко, Ю. К. Верес

*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь,
e-mail: belaqualab@gmail.com*

**ТРОФИЧЕСКИЙ СТАТУС ОЗЕРНЫХ ЭКОСИСТЕМ
И ЕГО СВЯЗЬ С ОСНОВНЫМИ ГИДРОЭКОЛОГИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ
ВОДОЕМОВ (НА ПРИМЕРЕ ОЗЕР НАРОЧАНСКОГО РЕГИОНА, БЕЛАРУСЬ)**

Аннотация. Изучение трофического статуса и его связь с основными гидроэкологическими характеристиками водоемов проводили на 11 озерах Нарочанского региона в 2013–2023 гг., которые представляют собой водоемы в широком диапазоне трофности – от олиго-мезотрофных до высокоэвтрофных. Трофический статус водоемов оценивали по индексу трофического состояния Карлсона (Trophy State Index, TSI). Результаты исследований показали, что TSI является адекватным показателем трофического статуса. Средневзвешенная для всей толщи воды валовая первичная продукция и деструкция планктона демонстрировали сильную и статистически значимую связь с уровнем трофности водоемов, оцененным по TSI. Отмечена сильная связь содержания хлорофилла с концентрацией общего фосфора. Связь хлорофилла с концентрацией общего азота значительно слабее, т. е. в изученных озерах основным лимитирующим биогенным элементом для развития фитопланктона является фосфор. Не отмечено никакой связи содержания хлорофилла и TSI со средней температурой, а также концентрацией растворенного кислорода в гипolimнионе. Оценка трофического статуса должна быть обязательным элементом проведения любых лимнологических исследований с целью формирования объективного представления о состоянии водного объекта.

Ключевые слова: озера, трофический статус, первичная продукция планктона, хлорофилл *a*, биогенные элементы, прозрачность, кислород

B. V. Adamowich, T. M. Mikheeva, R. Z. Kovalevskaya, T. V. Zhukova, N. V. Dubko, Yu. K. Veres

Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: belaqualab@gmail.com

**TROPHIC STATE OF LAKE ECOSYSTEMS AND ITS RELATIONSHIP
WITH THE MAIN HYDROECOLOGICAL CHARACTERISTICS OF WATER BODIES:
A CASE STUDY OF THE LAKES OF NAROCHANSKY REGION (BELARUS)**

Abstract. The study of trophic status and its relationship with the main hydroecological characteristics of water bodies was conducted in the 11 lakes of the Narochansky region from 2013 to 2023. The studied lakes of the Narochansky region span a considerable range of trophic status, from oligo-mesotrophic to highly eutrophic. The trophic status of the water bodies was evaluated using the Carlson's Trophic State Index (TSI). The results of our research demonstrate that TSI is an adequate indicator of trophic status. The weighted average gross primary production and plankton decomposition for the entire water column demonstrate a strong and statistically significant relationship with the trophic level of the water bodies assessed by TSI. A strong correlation was observed between chlorophyll content and total phosphorus concentration. The correlation between chlorophyll and total nitrogen concentration is significantly weaker, indicating that phosphorus is the primary limiting nutrient for phytoplankton growth in the studied lakes. No correlation was found between chlorophyll content and TSI with average temperature, as well as dissolved oxygen concentration in the hypolimnion. The assessment of trophic status should be considered an obligatory component of any limnological research endeavor, aimed at establishing an objective understanding of the condition of a water body.

Keywords: lakes, trophic state, plankton primary production, chlorophyll *a*, nutrients, transparency, oxygen

Б. У. Адамовіч, Т. М. Міхеева, Р. З. Кавалеўская, Т. В. Жукава, М. У. Дубко, Ю. К. Верас

Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт, Мінск, Беларусь, e-mail: belaqualab@gmail.com

**ТРАФІЧНЫ СТАТУС АЗЁРНЫХ ЭКАСІСТЭМ І ЯГО СВЯЗЬ З АСНОЎНЫМІ ГІДРАЭКАЛАГІЧНЫМІ
ХАРАКТАРЫСТЫКАМІ ВАДАЁМАЎ (НА ПРЫКЛАДЗЕ АЗЁР НАРАЧАНСКАГА РЭГІЁНА, БЕЛАРУСЬ)**

Анотацыя. Вывучэнне трафічнага статусу і яго сувязь з асноўнымі гідраэкалагічнымі характарыстыкамі вадаёмаў праводзілі на 11 азёрах Нарачанскага рэгіёна ў 2013–2023 гг., якія ўяўляюць сабой вадаёмы ў шырокім дыяпазоне трэфнасці – ад аліга-мезатрофных да высокаэвтрофных. Трафічны статус вадаёмаў ацэньвалі па індэксе трафічнага стану Карлсана (Trophy State Index, TSI). Вынікі даследаванняў паказалі, што TSI з'яўляецца адекватным паказчыкам трафічнага статусу. Сярэднеўзважаная для ўсёй тоўшчы вады валавая першасная прадукцыя і дэструкцыя планктону дэманстравалі моцную і статыстычна значную сувязь з узроўнем трэфнасці вадаёмаў, ацэненым па TSI. Адзначана моцная сувязь колькасці хлара-

філу з канцэнтрацыяй агульнага фосфару. Сувязь хларафілу з канцэнтрацыяй агульнага азоту значна слабей, гэта значыць у вывучаных азёрах асноўным біягенным элементам, які лімітуецца, для развіцця фітапланктону з'яўляецца фосфар. Не адзначана ніякай сувязі колькасці хларафілу і TSI з сярэдняй тэмпературай, а таксама канцэнтрацыяй растваранага кіслароду ў гіпалімініе. Ацэнка трафічнага статусу павінна быць абавязковым элементам правядзення любых лімналагічных даследаванняў з мэтай фарміравання аб'ектыўнага уяўлення аб стане воднага аб'екта.

Ключавыя словы: азёры, трафічны статус, першасная прадукцыя планктону, хларафіл *a*, біягенныя элементы, празрыстасць, кісларод

Введение. Трофический статус является ключевой гидроэкологической характеристикой водных объектов. Без его адекватной оценки невозможно понимание текущего состояния и перспектив развития водоема или водотока. Изучение трофического статуса водоемов, а также его связи со структурой и уровнем развития водных сообществ является одной из главных задач современной лимнологии и разрабатываемой в настоящее время теории функционирования водных экосистем. Понимание научных основ формирования трофического статуса является неременной основой эффективного и устойчивого использования ресурсов поверхностных вод.

Современный трофический статус каждого конкретного водоема определяет исторически сложившаяся совокупность таких географических и экологических факторов, как характер донных отложений, морфометрия озерной котловины, гидрохимический режим, структура и биогенная нагрузка на водосборную территорию [1, 2]. Измерение трофического статуса вытекает из концепции Э. Науманна об уровне продуктивности водной экосистемы [3]. Необходимость количественного выражения трофности нашла отражение в развитии и активном использовании индексов трофического состояния [4–6].

Трофический статус является интегральной характеристикой состояния озерной экосистемы и во многом определяет качество поверхностных вод. Проведение качественных и своевременных научных исследований, включающих в обязательном порядке оценку трофического статуса, является ключевой составляющей сохранения природной уникальности водных объектов. Без таких исследований невозможна адекватная оценка состояния и стадии эволюции водных экосистем. Динамичность водных экосистем предполагает регулярное проведение такого рода исследований в целях быстрой и адекватной реакции на какие-либо воздействия и позволит сохранить уникальность водного комплекса Беларуси.

Район исследований. Исследования проводили на озерах Нарочанского региона в 2013–2023 гг. Основные морфометрические показатели озер приведены в таблице. Пробы отбирали ежемесячно в глубоководной зоне озер в течение вегетационного сезона с мая по октябрь в озерах Нарочь, Мясстро и Баторино в 2013–2022 гг., в озере Большие Швакшты – в 2013–2015 и 2022 гг., в озере Белое – в 2013–2015 гг., в озере Малые Швакшты – в 2014–2015 гг., в озере Свирь – в 2018 и 2023 гг., в озерах Рудаково и Ходосы – в 2019 г., в озере Мядель – в 2022 г., в озере Вишневское – в 2023 г. Пробы воды отбирали при помощи двухлитрового батометра Рутнера на 3–6 горизонтах водного столба от поверхности до придонного слоя. Воду со всех горизонтов смешивали для получения интегральной пробы, отражающей средний состав озерной воды (объем воды каждого горизонта в интегральной пробе был пропорционален доле, которую составляет слой в общем объеме озера в соответствии с данными батиметрии).

Для определения первичной продукции и аэробной деструкции планктона применяли скляночный метод в кислородной модификации [7]. Измерения продукционных показателей проводили в пелагических зонах модельных водоемов в течение вегетационного сезона (май – октябрь) от поверхностного до придонного слоя на 7 горизонтах в озере Нарочь в 2013–2018 гг., 5 горизонтах в озере Мясстро в 2013 и 2017 гг., 4 горизонтах в озере Баторино в 2013 г., 5 горизонтах в озере Свирь в 2018 г., 4 горизонтах в озерах Большие Швакшты, Малые Швакшты и Белое в 2013 г., 4 горизонтах в озере Ходосы в 2019 г., 5 горизонтах в озере Рудаково в 2019 г. Значения продукционных показателей планктона рассчитывали двумя способами. В первом случае оценили продукционные показатели под m^2 . Вычисление проводили с помощью аппроксимации площади под кривой методом трапеций. Во втором случае показатель продукции и деструкции на определенном горизонте умножали на объем слоя воды, который занимает этот горизонт, и затем делили на весь объем воды в озере. Таким образом, мы получили средневзвешенное значение продукционных показателей планктона в единице объема воды для всего озера. Прозрачность воды (SD) определяли по стандартному белому диску Секки, содержание взвешенных веществ (SM) – гравиметрическим методом на мембранных фильтрах с диаметром пор 1,5 мкм. На этих же фильтрах оценивали содержание хлорофилла *a* без коррекции на присутствие феопигментов (Chl) спектрофотометрическим методом с экстракцией пигментов в 90%-м ацетоне [9]. Общее содержание азота (TN) определяли после окисления проб с персульфатом калия в автоклаве или с помощью элементного анализатора XPERT-TOC/TN_b (Trace Elemental Instruments, Netherlands), фосфора (TP) – после минерализации нефилтрованной воды с персульфатом калия в кислой среде на водяной бане.

Основные морфометрические показатели изученных озер [8]¹

Озеро	Площадь зеркала, км ²	Глубина средняя, м	Глубина максимальная, м	Длина береговой линии, км	Объем воды, млн м ³	Площадь водосбора, км ²	Время полного водообмена, лет	Тип перемешивания	Координаты точек отбора проб
Баторино	6,25 (5,98)	2,4	5,5	15 (15,09)	18,7	92,5	1	Полимиктическое	26°58'4,313" E 54°53'8,905" N
Белое	1,95 (2,02)	2,9	8,1	6,02 (6,22)	5,71	4,72	–	Полимиктическое	26°51'33,66" E 54°49'53,46" N
Большие Швакшты	9,56 (9,23)	2,3	5,3	13,05 (12,6)	22,3	84,6	1–2	Полимиктическое	26°35'46,703" E 54°57'51,720" N
Вишневоое	9,97 (10,15)	2	6,3	13,6 (13,56)	19,79	56,2	1,5	Полимиктическое	26°34'20,340" E 54°43'17,400" N
Малые Швакшты	1,91	1,5	3,2	6,75	2,86	105	1	Полимиктическое	26°33'4,772" E 54°59'43,134" N
Мядель	16,2 (15,84)	6,3	26,4	30,92 (34,95)	102	89,9	5	Полимиктическое	26°52'34,426" E 54°56'5,940" N
Мястро	13,1 (13,36)	5,4	11,3	20,2 (24,0)	70,1	133,1	2,5	Полимиктическое	26°52'50,951" E 54°52'0,464" N
Нарочь	79,6 (80,08)	8,9	24,8	41 (44,2)	710	279	10–11	Полимиктическое	26°43'13,448" E* 54°53'8,905" N* 26°46'45,725" E** 54°51'9,867" N**
Рудаково	0,24 (0,23)	11,3	28,6	2,01 (2,1)	2,85	1,2	10–11	Димиктическое	26°53'29,884" E 54°53'54,172" N
Свирь	22,28 (22,3)	4,7	8,7	31,15 (32,76)	104,26	364,3	1,5	Полимиктическое	26°28'5,820" E 54°48'27,120" N
Ходосы	0,1	3,6	9,3	1,65 (1,7)	0,36	0,9	–	Полимиктическое (макрофитное)	26°52'6,688" E 54°58'6,849" N

* – озеро Нарочь (малый плес); ** – озеро Нарочь (большой плес)

¹ В скобках приведены величины согласно ГИС Национального парка «Нарочанский».

Общее содержание органического углерода (ТС) определяли методом бихроматной окисляемости или как нелетучий органический углерод (NPOC) с помощью элементного анализатора XPERT-TOC/TN_b (Trace Elemental Instruments, Netherlands). Минеральные формы азота и фосфора определяли в фильтрованной воде фотоколориметрическими методами [10, 11]. Содержание растворенного в воде кислорода определяли методом Винклера либо с помощью оптического оксиметра Orion Star (Thermo Scientific, USA). Температуру измеряли, используя глубоководный термометр. Подробное описание методов и баз данных по изученным озерам приведено в [12].

Трофический статус водоемов оценивали по индексу, предложенному Р. Карлсоном [4]. Индекс трофического состояния (Trophy State Index, TSI) рассчитывали по каждому из предложенных Карлсоном параметров (прозрачность по диску Секки, концентрации хлорофилла *a* и общего фосфора) по формулам, описывающим логарифмические кривые изменения индекса [6]. В качестве интегрированного значения (TSI) взяли среднее из трех рассчитанных индексов.

Статистическую обработку и визуализацию данных проводили с использованием программных пакетов R [13].

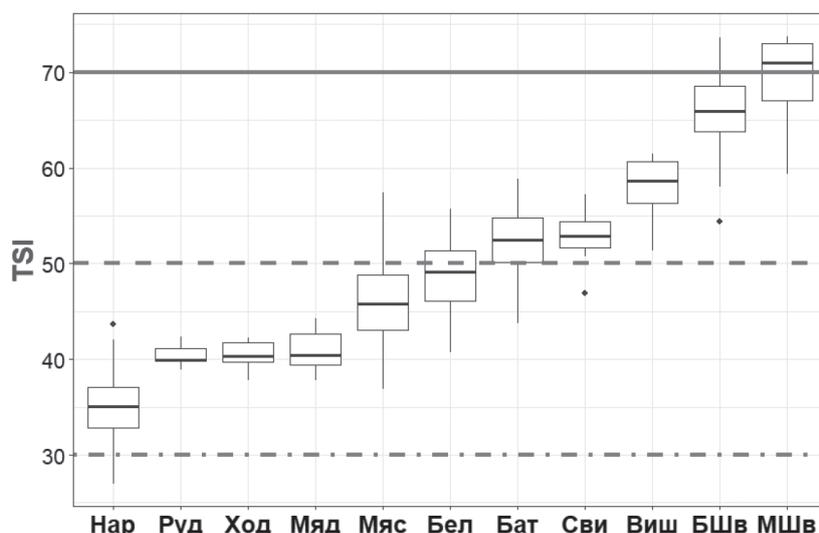


Рис. 1. Уровень трофности изученных озер в соответствии с TSI; Нар – озеро Нарочь, Руд – озеро Рудаково, Ход – озеро Ходосы, Мяд – озеро Мядель, Мяс – озеро Мястро, Бел – озеро Белое, Бат – озеро Баторино, Сви – озеро Свирь, Виш – озеро Вишневское, БШв – озеро Большие Швакшты, МШв – озеро Малые Швакшты (линия в «коробочке» показывает медианное значение показателя за весь период наблюдений, границы «коробочки» – 25 и 75 квартили, «усы» – 25 и 75 квартили +1,5 × интерквартильный размах, точки – выбросы за «усы»; штрихпунктирной линией обозначена условная граница олиготрофной и мезотрофной зон, штриховой линией – мезотрофной и эвтрофной зон, сплошной линией – эвтрофной и высокоэвтрофной зон)

Результаты и их обсуждение. Изученные озера Нарочанского региона представляют собой водоемы широкого диапазона трофности – от олиго-мезотрофных до высокоэвтрофных (рис. 1). Экосистемы озер, находящиеся выше и на границе эвтрофной зоны, испытывают сильную и устойчивую биогенную нагрузку.

Средневзвешенное значение валовой первичной продукции и деструкции планктона демонстрируют сильную и статистически значимую связь с уровнем трофности водоемов, оцененным по TSI (рис. 2). Не отмечено связи чистой первичной продукции, представляющей собой разницу между валовой продукцией и аэробной деструкцией, с TSI (см. рис. 2). При этом рассчитанные нами продукционно-деструкционные показатели планктона под м² значительно меньше связаны с TSI при коэффициентах аппроксимации регрессионных моделей (r^2) – от 0,056 до 0,260.

В наших исследованиях отмечена сильная связь содержания хлорофилла (Chl) с концентрацией общего фосфора (TP). Связь хлорофилла с концентрацией общего азота (TN) значительно слабее, т. е. очевидно, что в изученных озерах основным лимитирующим биогенным элементом для развития фитопланктона является фосфор. При этом не выявлено связи хлорофилла с концентрацией минерального фосфора (PO₄), в то время как с концентрацией минерального азота (N_{miner}) отмечена статически значимая связь (рис. 3).

Концентрация хлорофилла демонстрирует сильную связь с содержанием общего органического углерода (ТС) и БПК₅ (BOD₅). Эта связь в данном случае обуславливается тем, что основная биомасса

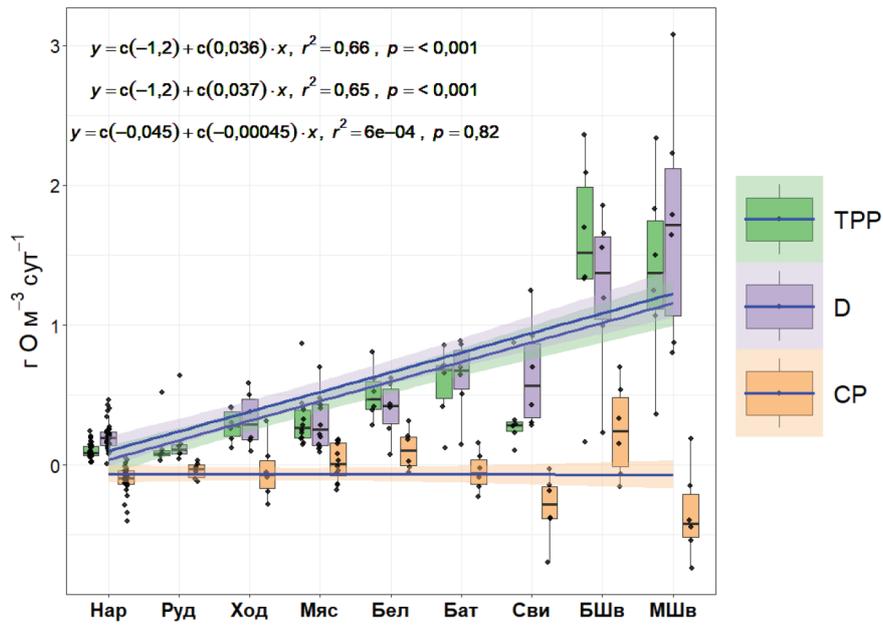


Рис. 2. Валовая первичная продукция (TPP), деструкция (D) и чистая продукция (CP) планктона в средневзвешенном объеме воды озер (озера расположены в порядке возрастания трофического статуса; уравнения и линии регрессии сверху вниз соответствуют TPP, D, CP; линия в «коробочке» показывает медианное значение показателя, границы «коробочки» – 25 и 75 квантили, «усы» – 25 и 75 квантили +1,5 × интерквантильный размах, точки – значения наблюдений)

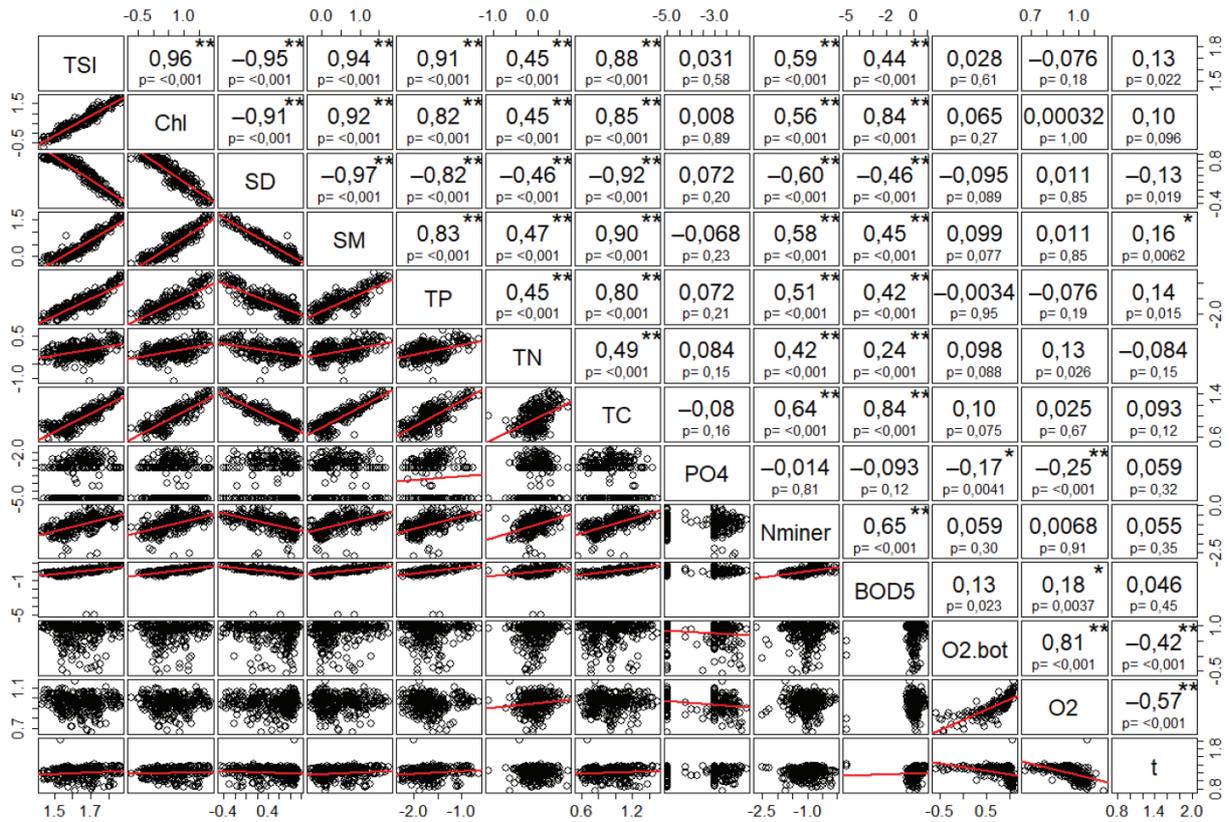


Рис. 3. Коэффициенты корреляции Пирсона (в правой верхней части) и линии сглаживания на диаграммах рассеяния (в левой нижней части) для гидроэкологических показателей изученных озер (уровень значимости (p) составляет: *p < 0,01; **p < 0,001; значение показателей логарифмированы по основанию 10; к нулевым значениям показателя перед логарифмированием прибавляли 0,001)

живых организмов как источников органического вещества, особенно в более эвтрофных озерах, представлена организмами фитопланктона (см. рис. 3).

Коэффициенты корреляции между прозрачностью воды по диску Секки (SD) и содержанием хлорофилла показывают фактически функциональную зависимость между этими показателями, из чего следует, что прозрачность воды является хорошим показателем трофического статуса изученных водоемов (см. рис. 3).

Не отмечено никакой связи содержания хлорофилла и TSI со средней температурой (t), а также средней концентрацией растворенного кислорода (O2) в столбе воды гипolimниона и его придонном слое (O2.bot). Это говорит о проблематичности, и даже невозможности, оценки трофического статуса по этим показателям (см. рис. 3).

Связь содержания общего фосфора и хлорофилла отчетлива видна при анализе большого массива данных по водоемам разной трофности (рис. 4). Однако если оценить связь хлорофилла с фосфором в каждом конкретном водоеме, эта связь будет не такой очевидной. На рис. 4 видно, что только для двух водоемов из 11 уровень значимости регрессионной модели (p) превышает 0,01. Сходная картина отмечена с общим азотом с той лишь разницей, что не видно выраженной тенденции связи содержания общего азота и хлорофилла в отдельных водоемах (рис. 5). Для минерального фосфора не установлено связи с хлорофиллом ни для общего массива данных, ни для каждого озера в отдельности (рис. 6).

Концентрация растворенного кислорода часто рассматривается как важный фактор, связанный с трофическим статусом водоемов. Наши данные показывают, что такой связи нет ни для массива данных по всем озерам, ни для каждого озера в отдельности (рис. 7).

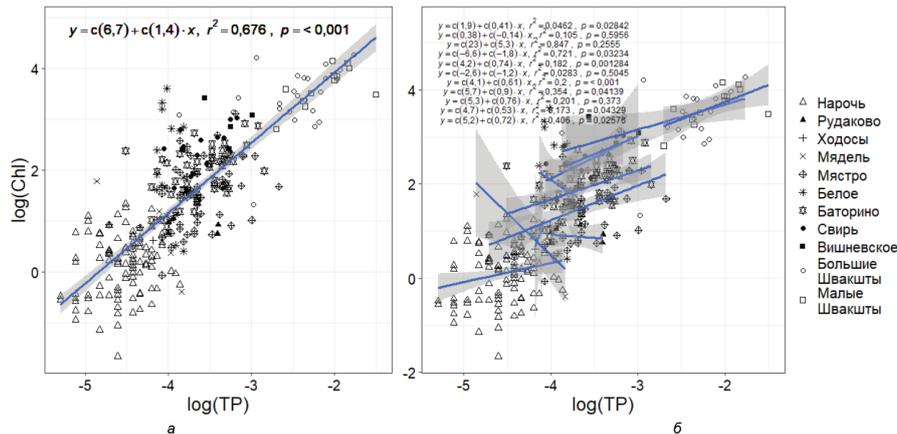


Рис. 4. Связь содержания общего фосфора в мг/л (TP) с концентрацией хлорофилла в мкг/л (Chl) в изученных озерах: а – для массива данных по всем озерам, б – для каждого озера в отдельности (значения показателей логарифмированы по основанию 10; уравнения по порядку соответствуют озерам, приведенным в легенде)

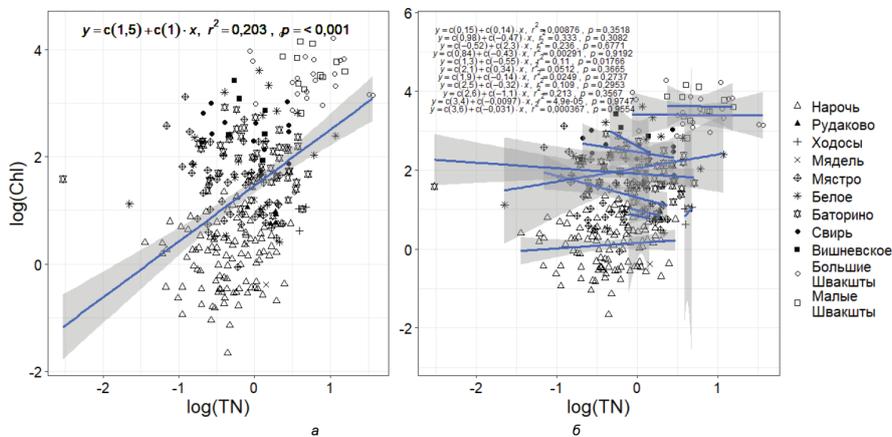


Рис. 5. Связь содержания общего азота в мг/л (TN) с концентрацией хлорофилла в мкг/л (Chl) в изученных озерах: а – для массива данных по всем озерам, б – для каждого озера в отдельности (значения показателей логарифмированы по основанию 10; уравнения по порядку соответствуют озерам, приведенным в легенде)

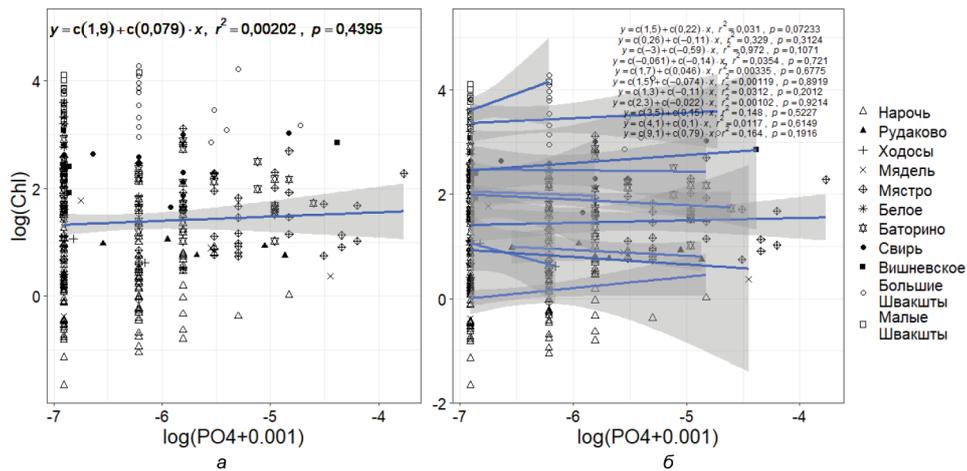


Рис. 6. Связь содержания минерального фосфора в мг/л (PO4) с концентрацией хлорофилла в мкг/л (Chl) в изученных озерах: а – для массива данных по всем озерам, б – для каждого озера в отдельности (значения показателей логарифмированы по основанию 10; уравнения по порядку соответствуют озерам, приведенным в легенде)

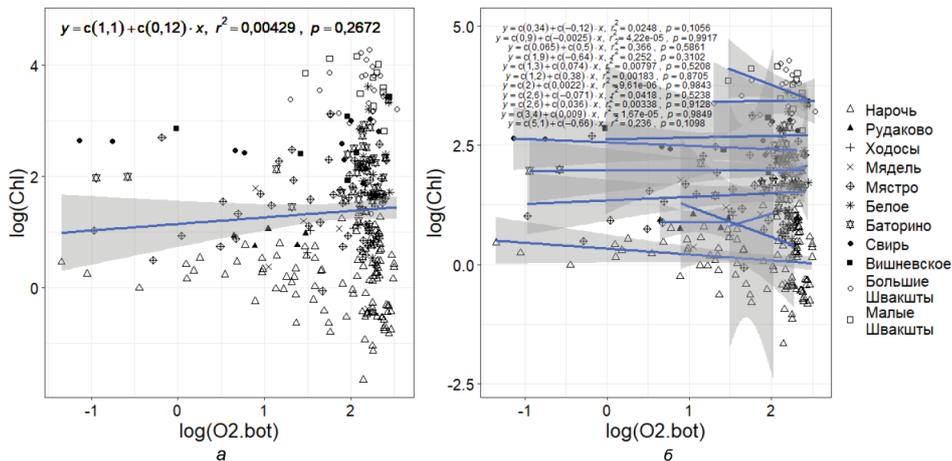


Рис. 7. Связь содержания растворенного кислорода в придонном слое гипolimниона в мг/л (O2.bot) с концентрацией хлорофилла в мкг/л (Chl) в изученных озерах: а – для массива данных по всем озерам, б – для каждого озера в отдельности (значения показателей логарифмированы по основанию 10; уравнения по порядку соответствуют озерам, приведенным в легенде)

Трофический статус является интегральным показателем и определяется географическими и экологическими параметрами: морфометрией озерной котловины, характером донных отложений, гидрохимическим режимом, биогенной нагрузкой на территорию водосбора и др. В свою очередь, трофический статус непосредственно связан со структурой и уровнем развития водных биологических сообществ [1, 6, 14–17]. Изучение трофического состояния водных объектов, а также выявление связей трофического статуса с развитием водных сообществ остаются одной из главных задач современной лимнологии и основой эффективного и устойчивого использования ресурсов поверхностных вод.

Исследования, связанные с трофностью водоемов, не теряют своей актуальности, несмотря на фактически столетний юбилей концепции трофического статуса водных экосистем, предложенной шведским лимнологом Э. Науманном [18]. В основе терминологии своей концепции Э. Науманн применил термины, которые К. Вебер [19] использовал для классификации содержания питательных веществ в болотах. Э. Науманн основал свою трофическую классификацию на продуктивности фитопланктона. По Э. Науманну, олиготрофные озера – это озера с низкой продуктивностью, никогда не приводящие к окрашиванию или даже помутнению воды. В эвтрофных озерах продуктивность достигает очень высоких значений, вода по большей части очень сильно замутнена или даже полностью окрашенная [3]. А. Тинеманн одновременно с Э. Науманном разработал схему классификации, основанную на видах бентосных организмов в озерах и концентрации кислорода в гипolimнионе [20]. На раннем этапе развития концепции в связи с ограниченностью данных натуральных наблюдений объединение этих двух классификаций

представлялось разумным. Однако, как подчеркивал Э. Науманн, трофическая классификация основана на продукции, а не на факторе, определяющем ее. Он считал азот и фосфор основными факторами, определяющими биологическую продуктивность водоемов [3].

Проблема изменения трофического состояния водных объектов особенно обострилась во второй половине XX в., когда процессы эвтрофирования, т. е. повышения продуктивности водных экосистем преимущественно под действием антропогенных факторов, приобрели глобальный характер. Бесспорная важность вопросов, связанных с эвтрофированием и ухудшением качества воды, обусловила актуальность адекватной оценки трофического статуса водных объектов. Необходимость количественного выражения трофности нашло отражение в развитии и активном использовании TSI [4, 5]. Результаты наших исследований трех озер Нарочанского региона за период 1978–2014 гг. [6], а также установленная в рамках данной работы сильная связь первичной продукции планктона с TSI (см. рис. 2), показали, что индекс трофического состояния, предложенный Р. Карлсоном [4], является адекватным показателем трофического статуса. Оценки, сделанные при расчете индекса по различным показателям (прозрачность, хлорофилл, общий фосфор), сопоставимы между собой и позволяют получать сравнимые оценки трофности даже при наличии только одного имеющегося показателя [6].

Многолетняя дискуссия о биогенных элементах, лимитирующих развитие фитопланктона в пресных водоемах, была разрешена в пользу фосфора во многом благодаря работам Р. Фолленвайдера [21, 22]. Серия его работ подтвердила идею о том, что трофическое состояние напрямую связано с фосфорной нагрузкой с водосбора. Связь концентрации фосфора с содержанием в воде хлорофилла *a* показана в пространственном аспекте как в региональном [23–27], так и в глобальном масштабе [28]. При этом отмечено, что для разнотипных водоемов характерна не линейная, а сигмоидальная связь [28, 29]. В наших исследованиях установлена четкая зависимость увеличения концентрации хлорофилла и, следовательно, повышения трофического статуса изученных озер с увеличением концентрации общего фосфора (см. рис. 4). Связь концентрации хлорофилла с содержанием общего азота гораздо слабее (см. рис. 5), при том, что она все равно является статистически значимой. Однако, по нашему мнению, ориентироваться на уровень значимости (*p*) при большом количестве наблюдений не всегда целесообразно, особенно при низких коэффициентах корреляции.

Не отмечено связи концентрации минерального фосфора с содержанием хлорофилла (см. рис. 6). Это неудивительно, ведь минеральные формы биогенных элементов представляют собой фактически неусвоенный ресурс для фитопланктона, а низкие концентрации фосфора и азота могут быть как следствием низкой биогенной нагрузки, так и следствием интенсивного потребления их фитопланктоном. Следовательно, низкие концентрации минеральных форм биогенных элементов могут быть отмечены и в низкотрофном и в высокотрофном водоемах. Низкие значения (вплоть до порога определения) минерального фосфора, часто регистрируемые в изученных нами озерах, как раз свидетельствуют о его дефиците и, соответственно, лимитировании развития фитопланктона по этому биогенному элементу. Отмеченная корреляция хлорофилла с содержанием минерального азота обусловлена, по всей видимости, не прямым лимитированием развития фитопланктона по этому элементу, а общей тенденцией увеличения содержания биогенных элементов с ростом трофического статуса водоемов.

Связь содержания фосфора с хлорофиллом в каждом из изученных нами озер (см. рис. 4) представляет фактически связь этих показателей в сезонной динамике, и именно эту связь проследить крайне сложно. Это говорит о том, что практически невозможно установить связи отдельных показателей с трофическим статусом в рамках изучения одного озера и без данных за полный вегетационный сезон. Если пространственная связь и связь в многолетней динамике при наличии выраженного тренда между содержанием фосфора и развитием фитопланктона показана довольно хорошо [26, 30, 31], то сезонная связь концентрации фосфора с уровнем развития фитопланктона либо не отражается в работах, либо не является значимой [30, 32]. Сезонная динамика азота и фосфора может быть очень вариабельна в течение сезона, при этом концентрация фосфора в воде увеличивается в летний период [23, 30, 33]. Концентрация фосфора определяется внешней и внутренней нагрузками [24, 33], и их сочетание может создавать различные варианты сезонной динамики фосфора. На внутреннюю динамику также влияет ряд факторов, интенсивность воздействия которых специфична для отдельных водоемов [34]. Разница в сезонной динамике фосфора и хлорофилла может быть вызвана рядом причин. Основной из них, по-видимому, является смена лимитирующего элемента с азота на фосфор, которая часто наблюдается в течение сезона [23, 35] при увеличении концентрации фосфора и снижении концентрации азота. Кроме того, высокие концентрации нитратов могут негативно действовать на фитопланктон и уменьшать концентрацию хлорофилла при высоких концентрациях фосфора и азота [36].

В основе концепции трофического статуса Э. Науманна лежат характеристики первичных планктонных продуцентов либо тесно с ними связанные гидробиологические или гидрохимические показатели, такие как содержание в воде хлорофилла, фосфора, азота, биомасса фитопланктона. В то же время

существуют аргументы в пользу необходимости использования показателей гетеротрофных сообществ для оценки трофического статуса водных экосистем, так как в пищевые сети включается не только органическое вещество, синтезированное в водоеме в процессе фотосинтеза, но и аллохтонная органика [1]. Нами было показано, что повышение трофического статуса озер Нарочь, Мясро и Баторино сопровождается увеличением в них численности гетеротрофного бактериопланктона [16]. При этом установлена обратная зависимость между трофическим статусом и численностью и биомассой макрозообентоса в трех озерах Нарочанского региона, т. е. для некоторых озер снижение трофического статуса приводит к увеличению обилия макробентоса, вероятно, из-за улучшения среды обитания донных животных [17].

В то же время индексы, численно отражающие трофический статус, не являются абсолютным показателем истинного трофического статуса водоема. Индекс характеризует текущее состояние показателей, выбранных для оценки трофического статуса в конкретный момент времени, в то время как трофический статус – это состояние водоема на конкретном историческом этапе развития его экосистемы, которое определяется возможностью водоема производить первичную продукцию планктона, а также реализацией этой возможности [37]. Так, единичные «цветения» фитопланктона могут наблюдаться в слабоэвтрофных водоемах [38]. Если отбор проб придется на этот момент, может сложиться ложное впечатление о высокой трофности водоема. Возможным решением этой проблемы и наиболее приемлемым вариантом приближения оценки трофического статуса с помощью численных индексов к реальному состоянию водоема могут быть относительно долговременные наблюдения за его состоянием как минимум в течение всего вегетационного сезона, а лучше нескольких сезонов. Кроме того, полезные сведения для приближения оценки трофического статуса к его реальному состоянию могут дать наблюдения за показателями, новыми для оценки трофического статуса. Так, на основании 20-летних наблюдений было показано, что относительно постоянная сезонная динамика гетеротрофного бактериопланктона позволяет адекватно оценить трофический статус водоема на основании данных за отдельные периоды [16].

Еще одним фактором, способным отразиться на адекватности оценки трофического статуса, может быть интенсивное развитие макрофитов [39, 40], которые конкурируют в водоеме за биогенные элементы с фитопланктоном. В этом случае выходом может стать принятие постулата, что трофность рассматривается как состояние водной толщи, т. е. в понимании, близком к пониманию Э. Науманна. Если под трофностью рассматривать всю первичную продукцию озера, включая макрофиты, микрофитобентос и перифитон, показатель трофического статуса при рассмотрении его связи с составом, структурой и функционированием биологических сообществ теряет смысл. Характеристику состояния макрофитного сообщества целесообразно приводить отдельно от оценки трофического статуса водоема.

Таким образом, несмотря на столетнюю историю, концепция трофического статуса не утратила своей актуальности и требует дальнейшего развития с помощью выявления как эмпирических, так и теоретических закономерностей. Оценка трофического статуса должна быть обязательным элементом проведения любых лимнологических исследований с целью формирования объективного представления о состоянии водного объекта. Наиболее приемлемым показателем для оценки трофического статуса в настоящее время является TSI, при этом отдельно должны приводиться сведения об интенсивности зарастания водоема макрофитами.

Благодарности. Авторы благодарят всех сотрудников НИЛ гидроэкологии и Нарочанской биологической станции, которые в разные годы участвовали в сборе и обработке материала. Финансовая поддержка некоторых стадий мониторинговых наблюдений осуществлялась в рамках грантов БРФФИ и Министерства образования Беларуси (включая задания ГПНИ ГР № 20212317 и № 20212395).

Список использованных источников

1. *Dodds, W. K.* Expanding the concept of trophic state in aquatic ecosystems: It's not just the autotrophs / W. K. Dodds, J. J. Cole // *Aquat. Sci.* – 2007. – № 69. – P. 427–439. <https://doi.org/10.1007/s00027-007-0922-1>
2. *Каратаев, А. Ю.* Факторы, влияющие на макрозообентос озер Беларуси / А. Ю. Каратаев, В. М. Самойленко, Л. Е. Бурлакова // *Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды: материалы Междунар. науч. конф.*, (Минск – Нарочь, 20–25 сент. 1999 г. / сост. и общ. ред. Т. М. Михеева. – Минск: БГУ, 2000. – С. 123–130.
3. *Naumann, E.* Ziel und Hauptprobleme der regionalen Limnologie. *Botaniska Notiser* / E. Naumann. – Lund, 1927. – P. 81–103.
4. *Carlson, R. E.* A trophic state index for lakes / R. E. Carlson // *Limnol. Oceanogr.* – 1977. – № 11. – P. 361–369. <https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.2.0361>
5. *Kratzer, C. R.* A Carlson-type trophic state index for nitrogen in Florida Lakes / C. R. Kratzer, P. L. Brezonik // *Water Resour. Bull.* – 1981. – Vol. 17. – P. 713–715. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1982.tb03982.x>
6. Long-term variations of the trophic state index in the Narochansk lakes and its relation with the major hydroecological parameters / B. V. Adamovich [et al.]. – *Water Resour.* – 2016. – Vol. 43. – P. 809–817. <https://doi.org/10.1134/S009780781605002X>
7. *Винберг, Г. Г.* Первичная продукция водоемов / Г. Г. Винберг. – Минск: Изд-во АН БССР, 1960. – 329 с.
8. *Озера Беларуси: справочник* / Б. П. Власов [и др.]. – Минск: Минсктиппроект, 2004. – 284 с.

9. Kovalevskaya, R. Z. Modification of the method of spectrophotometric determination of chlorophyll a in the suspended matter of water bodies / R. Z. Kovalevskaya, H. A. Zhukava, B. V. Adamovich // *J. Appl. Spectrosc.* – 2020. – Vol. 87, iss. 1. – P. 72–78. <https://doi.org/10.1007/s10812-020-00965-9>
10. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 541 с.
11. Wetzel, R. G. *Limnological analysis* / R. G. Wetzel, G. E. Likens. – 3rd ed. – New York, 2000. – 429 с.
12. База данных гидроэкологического мониторинга Нарочанских озер (Беларусь) / Б. В. Адамович [и др.] // *Эксперим. биология и биотехнология.* – 2024. – № 1. – С. 66–76.
13. R Core Team (2023). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.R-project.org>. – Date of access: 22.10.2023.
14. Wetzel, R. G. *Limnology. Lake and river ecosystems* (3rd ed.) / R. G. Wetzel. – New York: Academic, 2001. – 1024 p.
15. Schindler, D. W. Recent advances in the understanding and management of eutrophication / D. W. Schindler // *Limnol. Oceanogr.* – 2006. – Vol. 51, № 1, part 2. – P. 356–363. https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.1_part_2.0356
16. Relations between variations in the lake bacterioplankton abundance and the lake trophic state: Evidence from the 20-year monitoring / B. V. Adamovich [et al.] // *Ecolog. Indic.* – 2019. – № 97. – P. 120–129. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.09.049>
17. Temporal and spatial distribution of macrozoobenthos in three lakes of different trophic states: a case study of the Narochianskie lakes (Belarus) / B. V. Adamovich [et al.] // *Hydrobiol.* – 2023. – Vol. 851. – P. 1335–1351. <https://doi.org/10.1007/s10750-023-05395-0>
18. Naumann, E. Some aspects of the ecology of the limnoplankton, with special reference to the phytoplankton / E. Naumann // Translation from: *Svensk Botanisk Tidskrift.* – 1919. – Vol. 13, № 2. – P. 129–163.
19. Hutchinson, G. E. Eutrophication, past and present // *Eutrophication: causes, consequences, correctives* / G. E. Hutchinson. – Washington, DC: The National Academies Press, 1969. – 670 p.
20. Thienemann, A. Tropische Seen und Seetypenlehre / A. Thienemann // *Arch. Hydrobiol. Suppl.*, 1926. – № 9. – P. 205–231.
21. Vollenweider, R. A. The scientific basis of lake and stream eutrophication, with particular reference to phosphorus and nitrogen as eutrophication factors / R. A. Vollenweider // *Tech. Rep. OEKD, DAS (DSZ).* – 1968. – Vol. 27. – P. 1–182.
22. Vollenweider, R. A. Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication / R. A. Vollenweider // *Memorie dell'Istituto Italiano di Idrobiol.* – 1976. – Vol. 33. – P. 53–83.
23. Nitrogen or phosphorus limitation in lakes and its impact on phytoplankton biomass and submerged macrophyte cover / M. Søndergaard [et al.] // *Hydrobiol.* – 2017. – Vol. 795. – P. 35–48. <https://doi.org/10.1007/s10750-017-3110-x>
24. Seasonal dynamics in the concentrations and retention of phosphorus in shallow Danish lakes after reduced loading / M. Søndergaard [et al.] // *Aquat. Ecosyst. Health Manag.* – 2002. – Vol. 5, № 1. – P. 19–29. <https://doi.org/10.1080/14634980260199936>
25. Relationships between chlorophyll-a, phosphorus and nitrogen as fundamentals for controlling phytoplankton biomass in lakes / D. Magumba [et al.] // *Environ. Control Biol.* – 2013. – Vol. 51, № 4. – P. 179–185. <https://doi.org/10.2525/ecb.51.179>
26. Smith, V. H. Chlorophyll-phosphorus relations in individual lakes. Their importance to lake restoration strategies / V. H. Smith, J. Shapiro // *Environ. Sci. Technol.* – 1981. – Vol. 15, № 4. – P. 444–451. <https://doi.org/10.1021/es00086a009>
27. Pothoven, S. A. Seasonal patterns for Secchi depth, chlorophyll a, total phosphorus, and nutrient limitation differ between nearshore and offshore in Lake Michigan / S. A. Pothoven, H. A. Vanderploeg // *J. Great Lakes Res.* – 2020. – Vol. 46, № 3. – P. 519–527.
28. Relationships of total phosphorus and chlorophyll in lakes worldwide / R. Quinlan [et al.] // *Limnol. Oceanogr.* – 2021. – Vol. 66. – P. 392–404. <https://doi.org/10.1002/lno.11611>
29. McCauley, E. Sigmoid relationships between nutrients and chlorophyll among lakes / E. McCauley, J. A. Downing, S. Watson // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* – 1989. – Vol. 46, № 7. – P. 1171–1175. <https://doi.org/10.1139/f89-152>
30. Søndergaard, M. Seasonal response of nutrients to reduced phosphorus loading in 12 Danish lakes / M. Søndergaard, J. P. Jensen, E. Jeppesen // *Freshwater Biol.* – 2005. – Vol. 50. – P. 1605–1615. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2005.01412.x>
31. Temporal and seasonal trends in nutrient dynamics and biomass measures in lakes Michigan and Ontario in response to phosphorus control / T. H. Johengen [et al.] // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1994. – Vol. 51, № 11. – P. 2570–2578. <https://doi.org/10.1139/f94-257>
32. Seasonal water quality and algal responses to monsoon-mediated nutrient enrichment, flow regime, drought, and flood in a drinking water reservoir. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* – 2021. – Vol. 18. – P. 10714. <https://doi.org/10.3390/ijerph182010714>
33. Søndergaard, M. Lake Søbygaard, Denmark: Phosphorus dynamics during the first 35 years after an external loading reduction. In AD Steinman & BM Spears (red), *Internal phosphorus loading in lakes: causes, case studies, and management* / M. Søndergaard, E. Jeppesen // *Internal phosphorus loading in lakes: causes, case studies, and management* / A. D. Steinman, B. M. Spears (eds.). – Florida: J. Ross Publishing, 2020. – P. 285–299.
34. Anderson, J. Ecological effects of reduced nutrient loading (oligotrophication) on lakes: an introduction / J. N. Anderson, E. Jeppesen, M. Søndergaard // *Freshwater Biol.* – 2005. – Vol. 50. – P. 1589–1593. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2005.01433.x>
35. Rethinking the role of nitrogen and phosphorus in the eutrophication of aquatic ecosystems / A. Smyth [et al.] // *EDIS.* – 2022. – Vol. 1. <https://doi.org/10.32473/edis-sg118-2022>
36. Filstrup, C. T. Relationship of chlorophyll to phosphorus and nitrogen in nutrient-rich lakes / C. T. Filstrup, J. A. Downing // *Inland Waters.* – 2017. – Vol. 7, № 4. – P. 385–400. <https://doi.org/10.1080/20442041.2017.1375176>
37. The main factor determining the dynamics of the lake ecosystem under excessive nutrient loading (a case study on the Naroch Lakes) / T. I. Kazantseva [et al.] // *Contemp. Probl. Ecol.* – 2019. – Vol. 12, № 6. – P. 544–561. <https://doi.org/10.1134/S1995425519060052>
38. Cyanobacterial blooms in oligotrophic lakes: Shifting the high-nutrient paradigm / K. L. Reinl [et al.] // *Freshwater Biol.* – 2021. – Vol. 66. – P. 1846–1859. <https://doi.org/10.1111/fwb.13791>
39. Phytoplankton of Lake Bol'shie Shvakshty (Belarus) during the Shift of the Ecosystem from a Macrophyte–Weakly Eutrophic to a Phytoplankton–Hypereutrophic State / T. M. Mikheyeva [et al.] // *Contemp. Probl. Ecol.* – 2018. – Vol. 11. – P. 563–575. <https://doi.org/10.1134/S1995425518060057>
40. Carlson, R. E. A coordinator's guide to volunteer lake monitoring methods / R. E. Carlson, J. Simpson. – North American Lake Management Society, 1996. – 96 p.

Поступила 04.03.2024