

УДК 574.524;574.55;574.583;574.633

ПИГМЕНТНЫЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕР НАРОЧЬ И МЯСТРО

О. С. СМОЛЬСКАЯ¹⁾, А. А. ЖУКОВА¹⁾, А. С. ЛЮЛЯ¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

В образцах поверхностного слоя донных отложений озер Нарочь и Мясстро, собранных летом 2016 и 2017 гг., были изучены основные физико-химические параметры (плотность, влажность и удельное содержание органического вещества), а также содержание хлорофилла и продуктов его распада. Рассчитаны пигментные индексы, отражающие состояние продуцентов в экосистеме, в первую очередь фитопланктона: E_{450}/E_{480} , E_{480}/E_{664} , E_{430}/E_{664} , E_{480}/E_{665} , $E_{480}/1,7E_{665k}$, E_{430}/E_{412} . Предложены вспомогательные пигментные индексы контроля чистоты экстракта и четкости прописанного спектра: E_{664}/E_{720} , E_{430}/E_{720} , E_{412}/E_{720} , E_{530}/E_{720} , E_{430}/E_{530} , E_{664}/E_{530} и E_{412}/E_{664} . Эти индексы могут быть использованы как критерии качества исследованной пробы и ее пригодности для расчета пигментных индексов состояния экосистемы.

Ключевые слова: донные отложения; влажность; плотность; содержание органических веществ; хлорофилл; феопигменты; спектр поглощения; пигментные индексы.

ANALYSIS OF PIGMENT, PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF BOTTOM SEDIMENTS IN LAKES NAROCH AND MYASTRO

O. S. SMOLSKAYA^a, H. A. ZHUKAVA^a, A. S. LYULYA^a

^aBelarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: O. S. Smolskaya (sylyimova_1991@mail.ru)

In the samples of the surface layer the bottom sediments of the Naroch and Myastro lakes, collected in the summer of 2016 and 2017, the main physical and chemical parameters (density, wetness and organic matter content), as well as the content of chlorophyll and its decay products were studied. Pigment indices that reflect the general condition of the producers in the ecosystem, primarily phytoplankton: E_{450}/E_{480} , E_{480}/E_{664} , E_{430}/E_{664} , E_{480}/E_{665} , $E_{480}/1,7E_{665k}$, E_{430}/E_{412} were calculated. The auxiliary pigment indexes suggested for controlling the purity of the extract and the clarity of the prescribed spectrum: E_{664}/E_{720} , E_{430}/E_{720} , E_{412}/E_{720} , E_{530}/E_{720} , E_{430}/E_{530} , E_{664}/E_{530} , E_{412}/E_{664} ; can be used as quality criteria of the tested sample and its suitability for the calculation of pigment indices characterizing the state of producers in an ecosystem.

Key words: bottom sediments; humidity; density; organic matter content; chlorophyll; phaeopigments; absorption spectrum; pigment indices.

Образец цитирования:

Смольская ОС, Жукова АА, Люля АС. Пигментные и физико-химические характеристики донных отложений озер Нарочь и Мясстро. *Журнал Белорусского государственного университета. Биология*. 2018;2:65–77.

For citation:

Smolskaya OS, Zhukava HA, Lyulya AS. Analysis of pigment, physical and chemical characteristics of bottom sediments in lakes Naroch and Myastro. *Journal of the Belarusian State University. Biology*. 2018;2:65–77 (in Russ.).

Авторы:

Ольга Сергеевна Смольская – аспирантка кафедры общей экологии и методики преподавания биологии биологического факультета. Научный руководитель – А. А. Жукова.

Анна Анатольевна Жукова – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры экологии и методики преподавания биологии биологического факультета.

Анастасия Сергеевна Люля – студентка биологического факультета.

Authors:

Ol'ga S. Smolskaya, postgraduate student at the department of general ecology and methods of biology teaching, faculty of biology.

sylyimova_1991@mail.ru

Hanna A. Zhukava, PhD (biology), docent; associate professor at the department of ecology and methods of biology teaching, faculty of biology.

anna_eco@tut.by

Anastasia S. Lyulya, student at the faculty of biology.

Введение

Оценка экологического состояния разнотипных водных объектов, вне зависимости от трофического статуса, должна учитывать все этапы трансформации органического вещества в водоеме с момента его образования продуцентами до разложения редуцентами. Донные отложения дают ценную информацию о структурно-функциональных особенностях пресноводных экосистем, поскольку способны накапливать биогенные элементы и органические вещества, что служит причиной эвтрофирования, могут способствовать выведению загрязняющих веществ из биотического круговорота и являются местом их депонирования [1].

На сегодняшний день из-за отсутствия постоянного мониторинга сложно оценить состояние многих пресноводных объектов. Для того чтобы понять причины и механизмы изменения трофического состояния водоемов, следует учитывать все важные биологические факторы и антропогенные воздействия на пресноводные экосистемы, совершенствовать методы исследования. Именно с этой целью необходимо вести регулярные наблюдения в природных условиях, а не только оценивать состояние экосистемы по расчетам в лабораториях.

Для гидробиологических исследований остается актуальным поиск быстрых и информативных показателей оценки экологического состояния водоемов. Одним из ключевых элементов для решения этой задачи может служить содержание хлорофилла – этот подход положен в основу шкал, разработанных для оценки трофического статуса водоемов и качества воды. Дополнительную информацию о состоянии планктонных продуцентов также могут дать характеристики пигментного состава фитопланктона [2].

Растительные пигменты в современной гидробиологии используются как показатели, с помощью которых можно определить антропогенное влияние на водоемы, продуктивность экосистемы, процессы, которые происходят внутри водного объекта. Любой водоем характеризуется определенным пигментным фоном в зависимости от присутствующих растительных сообществ, производящих первичную продукцию. Одним из важных индикаторов физико-химического состояния и обменных процессов в водоемах являются растительные пигменты и продукты их трансформации, сохраняющиеся в донных отложениях [1].

Донные отложения в озерах включают широкий спектр каротиноидов, хлорофиллов и других липид-растворимых пигментов, продуцируемых фототрофными организмами как в водоеме, так и в окружающем его водосборном бассейне. Донные отложения также содержат производные самых распространенных пигментов, включая изомеры, алломеры и разнообразные пигментспецифические структурные модификации. Пигменты донных отложений обладают некоторыми свойствами, благодаря которым представляют интерес для гидробиологии, как то: общие исходные биосинтетические пути в каждом классе молекул; различные химические структуры, возникающие в результате специфических стадий во время биосинтеза; повсеместное распространение среди автотрофных организмов с некоторыми таксономическими особенностями; относительная легкость анализа [3].

Основными источниками пигментов в водоемах являются сообщества планктонных и бентосных водорослей, автотрофных популяций бактерий и высших водных растений. В дальнейшем пигменты деградируют как в водной толще, так и при последующем осаждении в отложениях. Трансформация пигментов в водной толще обычно очень обширная и включает комплексные процессы, которые определяют количество и пигментный состав в поверхностных осадках. Деградация пигментов в донных отложениях слабо выражена, особенно при бескислородном состоянии, но может зависеть от наличия в них беспозвоночных.

Процессы деградации различаются между хлорофиллами и каротиноидами. Так, каротиноиды превращаются в *цис*-каротиноиды, а затем в бесцветные соединения путем расщепления конъюгированной (диеновой) системы, хлорофиллы обычно деградируют до феофитинов за счет потери атомов магния из тетрапирольного кольца и феофорбидов после потери фитольной цепи и различных боковых групп [3].

В последнее время в научной литературе анализируется возможность по характеру спектров поглощения света пигментами определять некоторые важные структурные показатели фитопланктона в водной толще и донных отложениях. В частности, в коротковолновой области спектра поглощения установлено отличие некоторых групп водорослей и цианобактерий от других групп в зависимости от присутствующего типа хлорофилл-белкового комплекса и фукоксантина или фикобилинов, и на этой основе разработан способ оценки качества воды по пигментному индексу E_{450}/E_{480} [2; 4]. Показано, что соотношение хлорофиллов, феопигментов и каротиноидов фитопланктона является значимым для оценки качества вод, при этом применяют пигментные индексы E_{480}/E_{664} , E_{430}/E_{664} , которые могут отражать физиологическое состояние водорослей и функционирование планктонного сообщества в целом [5]. Темпы деградации сильно различаются среди различных пигментов. Самые быстрые разрушения

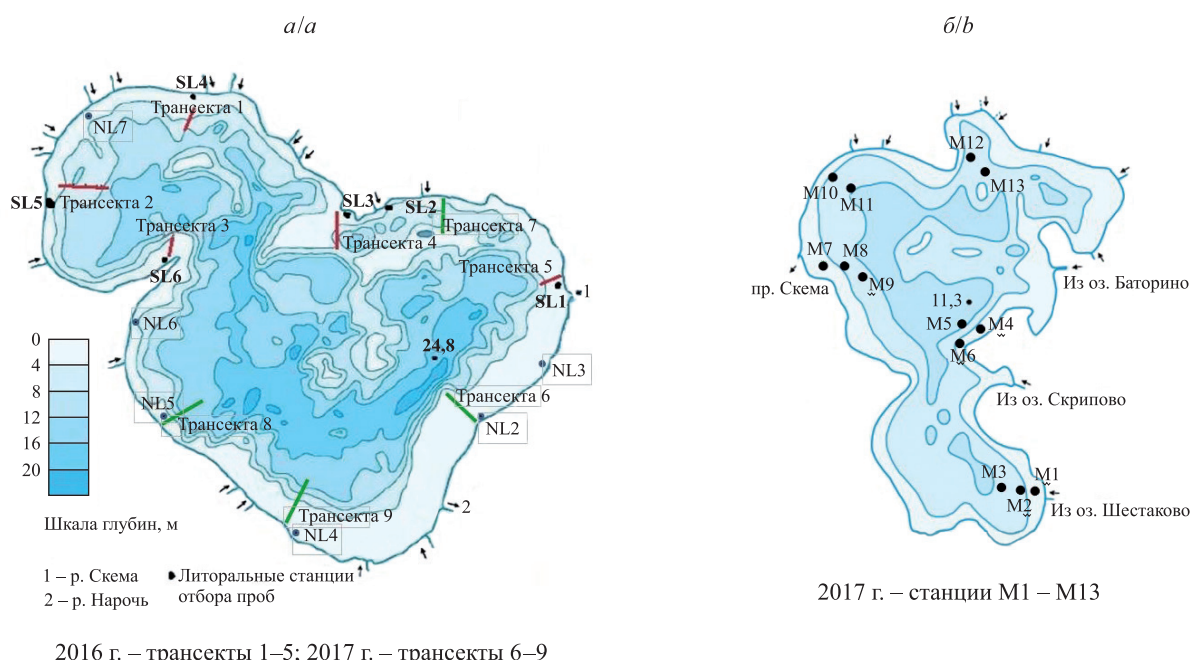
происходят, когда пигменты подвергаются одновременному действию высокой интенсивности излучения, температуры и кислорода, т. е. находятся в состоянии, характерном для эпилимниона водоемов. Кроме того, важно учитывать скорость осаждения органического биогенного материала, на которую оказывают влияние многие факторы, например питание планктонных беспозвоночных и скорость осаждения клеток. Все эти особенности необходимо учитывать при исследовании пигментного состава фитопланктона и донных осадков и изучении спектров их поглощения [3; 6].

Основным подходом, который позволяет определить содержание растительных пигментов в водной толще и донных отложениях, является спектрофотометрический метод [6; 7]. Зарубежными авторами широко используется оценка культуры фитопланктона по содержанию фотосинтетических пигментов, так как последние специфичны для растительного материала и их спектрофотометрическая оценка довольно проста. Однако необходимо помнить, что наличие в природных водах продуктов деградации пигментов, имеющих видимые спектры поглощения, аналогичные тем, которые относятся к хлорофиллам, служит источником возможных ошибок определения [8]. В связи с этим актуальной является апробация разработанных методик в полевых условиях на примере хорошо изученных в гидро-экологическом отношении водных экосистем. Интерес для дальнейшего исследования представляет установление связи содержания растительных пигментов в донных отложениях с трофическим состоянием водной экосистемы [2].

Цель данной работы – определение спектров поглощения пигментов и оценка спектральных пигментных индексов для донных отложений озер Нарочь и Мясро.

Материалы и методы исследования

Исследование проводили на базе УНЦ «Нарочанская биологическая станция имени Г. Г. Винберга» во второй половине июля 2016 г. и 2017 г. Отбор проб выполняли вручную при помощи водолазного оборудования. В 2016 г. материал был собран в оз. Нарочь с 28 учетных площадок, на пяти трансектах, расположенных в основном по периферии Малого плеса озера. В 2017 г. была дообследована акватория Большого плеса (собран материал с 17 учетных площадок на четырех трансектах), а также проведено обследование оз. Мясро (собран материал с 13 учетных площадок) (см. рисунок).



Картограммы отбора проб на исследованных станциях озер Нарочь (а) и Мясро (б)
The sampling maps at the stations of the Naroch (a) and Myastro (b) lakes

Для определения содержания хлорофилла и феопигментов в общем экстракте использовали спектрофотометрический метод [9; 10], который широко применяется для изучения продуктивности фитопланктона в разнотипных водных объектах и отличается простотой определения и экспрессностью в получении результатов. Однако этот метод применим только для приблизительной оценки общего содержания хлорофиллов как в толще воды, так и в донных отложениях по величине светопоглощения на участках

спектров, соответствующих максимумам в синей и красной областях; он не дает возможности получить истинные концентрации отдельных пигментов [9].

Спектры поглощения пигментов в донных отложениях определяли с использованием спектрофотометра Cary 50 (USA) (приложение Scan). Пробы донных отложений в 2016 г. обрабатывали в течение суток после отбора. Пробы 2017 г. обрабатывали дважды, сразу после их отбора и спустя 1,5 мес. хранения в холодильнике, в целях изучения изменения пигментных комплексов при хранении.

Собранные образцы грунта перемешивали до однородной массы, из которой отбирали навеску для анализа содержания хлорофилла (суммарного, без поправки на присутствие в смеси других пигментов) и феопигментов [11], считывания спектра поглощения и расчета пигментных индексов; оставшуюся часть использовали для определения плотности и влажности грунта, а также содержания в нем органического вещества. В зависимости от типа грунта исходная влажная масса исследованной навески колебалась от 2,2 до 11,0 г. Навеску грунта взвешивали на электронных весах (SPU 202, USA), помещали в пробирки и заливали 90 % ацетоном, перемешивали и оставляли на несколько часов для экстракции в темном месте. Далее пробирки центрифугировали дважды по 15 мин при 5000 об/мин, полученный экстракт осторожно переносили в стеклянные пробирки для измерения на спектрофотометре. Измерение оптической плотности экстракта на различных длинах волн проводили в диапазоне 350–800 нм с шагом 1 нм в исходных ацетоновых экстрактах и пробах, подкисленных несколькими каплями 0,01 N соляной кислоты (хлорофиллы переходят в феопигменты), при этом использовали кварцевую кювету длиной 2 см.

Контроль чистоты экстракта проводили по светопоглощению на длине волны 750 нм (720 нм) [6]. Известно, что абсолютно чистый раствор пигментов (т. е. с нулевой оптической плотностью или стопроцентным пропусканием на указанном диапазоне длин волн) очень трудно получить на природном материале. Поэтому допустимой считается величина, равная 0,005 в расчете на 1 см слоя раствора при оптимальной оптической плотности [9], т. е. для кюветы длиной 2 см допустимая величина составляет 0,01. Если последняя имеет более высокое значение, то центрифугирование следует повторить.

По спектрам поглощения комплекса пигментов донных отложений были рассчитаны значения пигментных индексов, которые использовали для анализа возможности применения спектрального подхода к оценке состояния исследованных водных объектов. При статистической обработке данных использовали программные пакеты *Microsoft Excel* и *Statistica 8.0*.

Результаты исследования и их обсуждение

Согласно стандартным методам [6; 7] для расчета концентрации хлорофиллов, кроме измерений на участках максимального для пигментов светопоглощения, проводят также измерения в крайней длинноволновой области видимого спектра на длине волны 750 нм. Это необходимо, чтобы убедиться в отсутствии неспецифического поглощения света, возникающего за счет взвесей и растворимых окрашенных соединений, среди которых могут быть и дериваты некоторых пигментов. В одной из предыдущих работ [12], анализируя пигментный состав взвешенного в воде вещества разнотипных водоемов, нами было сделано заключение, что нет статистически значимой разницы между значениями светопоглощения на длинах волн 720 и 750 нм, поэтому можно сократить длину изучаемого отрезка спектра с 750 до 720 нм, что уменьшит объем временных затрат на получение спектра и ускорит анализ данных. Выводы сделаны на основании результатов анализа многолетних наблюдений, когда не было выявлено различий в спектральных данных, относящихся к различным водным объектам и собранных в разные временные промежутки, на длинах волн 750 и 720 нм.

В рамках нашего исследования был также проведен аналогичный статистический анализ спектральных данных для донных отложений. Проанализировав весь массив данных на различных глубинах озер, можно заключить, что в 2016 г. светопоглощение на длине волны 750 нм изменялось в пределах 0,002–0,010, составив в среднем ($\pm SD$) $0,008 \pm 0,002$; в 2017 г. значения колебались от 0,001 до 0,010, в среднем $0,006 \pm 0,007$ [13]. По результатам сравнения двух групп значений светопоглощения (при длинах волн 720 и 750 нм) с помощью U-теста Манна – Уитни (Mann – Whitney U test) получено: $P = 0,85$ в 2016 г.; $P = 0,80$ в 2017 г. Таким образом, тест указывает на отсутствие статистически значимой разницы между массивами данных с измерениями светопоглощения на длинах волн 750 и 720 нм для донных отложений.

Исследование базовых физико-химических показателей донных отложений (табл. 1, 2) показало, что на мелководных участках оз. Нарочь (около 2 м) донные отложения представлены песком, который при погружении в глубь озера сменяется заиленным песком (3,5 м) и далее (6–8 м) – разного типа сапропелями. В оз. Мясстро на исследованных станциях донные грунты также представлены заиленным песком и сапропелями (табл. 3).

Таблица 1

Физико-химические свойства донных отложений оз. Нарочь
и содержание в них хлорофилла и феопигментов, 2016 г.

Table 1

Physical and chemical properties of bottom sediments of the lake Naroch
and the content of chlorophyll and phaeopigments, 2016

Станция	Глубина станции, м	Содержание хлорофилла*, мкг/г	Доля феопигментов в общем форбине, %	Относительная влажность**, %	Плотность**, г/см ³	Органическое вещество**, % в сухой массе
Трансекта 1						
S1	1,9	12,32	90,70	23,1 ± 2,2	1,31 ± 0,08	0,7 ± 0,1
S3	3,1	11,42	94,88	74,8 ± 4,7	1,27 ± 0,03	4,3 ± 0,2
S4	3,0	2,95	83,57	74,6 ± 1,2	1,32 ± 0,10	4,2 ± 0,5
S6	3,1	—	—	76,3 ± 7,3	1,26 ± 0,06	4,3 ± 0,7
Трансекта 2						
S7	6,6	9,03	≈100	86,0 ± 2,0	1,18 ± 0,02	15,6 ± 0,9
S8	5,5	9,18	≈100	—	—	—
S9	4,7	7,82	88,29	97,9 ± 0,3	1,17 ± 0,03	1,2 ± 0,3
S10	3,0	3,09	84,02	74,3 ± 3,5	1,27 ± 0,16	4,3 ± 0,5
S11	2,5	16,96	89,03	37,9 ± 4,8	1,30 ± 0,21	2,6 ± 0,6
S13	2,1	7,99	91,04	34,1 ± 1,4	1,30 ± 0,13	2,2 ± 0,2
S14	2,2	8,25	99,87	34,9 ± 0,3	1,29 ± 0,08	2,5 ± 0,5
S15	2,2	4,72	96,87	37,5 ± 1,2	1,28 ± 0,02	2,6 ± 0,5
S16	1,5	4,19	89,53	28,9 ± 0,5	1,33 ± 0,02	0,6 ± 0,0
Трансекта 3						
S17	4,6	2,23	≈100	78,1 ± 3,2	1,25 ± 0,06	6,2 ± 0,1
S18	1,8	4,13	92,30	24,4 ± 1,8	1,52 ± 0,06	0,6 ± 0,1
S19	1,6	9,37	94,30	25,5 ± 0,9	1,33 ± 0,00	0,7 ± 0,2
Трансекта 4						
S20	1,6	1,57	93,47	23,3 ± 2,2	1,36 ± 0,06	0,4 ± 0,1
S21	1,7	4,76	81,43	27,1 ± 1,8	1,33 ± 0,04	0,6 ± 0,04
S22	2,1	3,73	98,40	37,4 ± 0,0	1,36 ± 0,22	2,4 ± 0,4
S23	2,4	9,48	89,38	60,0 ± 3,5	1,29 ± 0,06	4,0 ± 0,5
S24	3,0	5,59	88,71	75,8 ± 1,7	1,27 ± 0,07	4,4 ± 0,6
Трансекта 5						
S25	2,6	0,93	≈100	58,3 ± 5,9	1,49 ± 0,15	4,3 ± 0,7
S26	3,8	3,06	85,22	79,8 ± 5,3	1,39 ± 0,09	7,0 ± 0,8
S27	4,5	4,10	76,92	73,0 ± 1,5	1,25 ± 0,05	5,7 ± 2,2
S28	7,0	1,98	99,30	92,1 ± 3,1	1,12 ± 0,03	18,2 ± 0,5
S29	7,4	4,07	96,26	95,4 ± 1,7	1,07 ± 0,04	25,3 ± 2,0

Примечание. Здесь и в табл. 2 и 3: * – без поправки на присутствие феопигментов; ** – средние ± SD для 3 повторностей.

Всего за 2016 г. было отобрано 25 проб на глубинах от 1,5 до 7,4 м, относящихся к 5 трансектам. С увеличением глубины возрастает относительная влажность седиментов, снижается их плотность и повышается содержание органических веществ.

На исследованных станциях содержание хлорофилла *a* и продуктов его распада было невысоким и составило в среднем ($6,1 \pm 3,1$) мкг/г сырой массы донных отложений при колебаниях от 1 до 17 мкг/г. Проанализировав изменения содержания хлорофилла по глубинам, можно сделать вывод об отсутствии связи между этими показателями. Доля феопигментов была достаточно высокой во всех пробах, что характерно для донных отложений на средних и больших глубинах озер. Данный показатель изменялся от 77 до практически 100 %. Для удельного содержания феопигментов в общем форбине также не выявлено зависимости по глубинам и не наблюдается корреляции с суммарным содержанием хлорофилла *a* (без поправки на присутствие феопигментов).

В 2017 г. нами проведено двукратное измерение хлорофилла *a* и феопигментов на озерах Нарочь и Мястро с целью отследить, как изменяются исследуемые показатели с течением времени. На оз. Нарочь в 80 % случаев при обработке проб после длительного хранения содержание хлорофилла уменьшалось (в среднем в 1,8 раза). Зависимости данного показателя от глубины отбора проб не выявлено. Минимальное значение по содержанию хлорофилла сразу после отбора составило 0,44 мкг/г, и оно практически не изменилось после хранения – 0,43 мкг/г (станция N9); максимальное значение в выборке (станция N12), наоборот, значительно снизилось – с 6,73 до 1,43 мкг/г соответственно. Среднее значение во всех образцах при определении сразу после отбора составило ($1,9 \pm 1,1$) мкг/г, после хранения – ($1,2 \pm 0,6$) мкг/г. На оз. Мястро наблюдали схожую ситуацию: содержание хлорофилла сразу после отбора проб и после хранения в большинстве проб снижалось, но в некоторых образцах после хранения отмечены более высокие значения (что может быть связано со структурной гетерогенностью донных отложений и попаданием в анализ навесок с более высоким содержанием пигментов). Содержание хлорофилла в первом случае колебалось от 0,25 до 5,3 мкг/г, после хранения – от 0,1 до 2,8 мкг/г. В среднем суммарное содержание хлорофиллов без поправки на присутствие феопигментов в донных грунтах оз. Мястро составило до хранения ($1,8 \pm 1,3$) мкг/г и после хранения ($1,6 \pm 1,4$) мкг/г. Доля феопигментов в общем форбине в озерах изменялась в пределах 80–100 %. Причем практически во всех исследованных пробах наблюдали увеличение доли феопигментов спустя 1,5 мес. хранения по сравнению с данными, полученными сразу после отбора проб (в среднем в 1,2 раза).

Таблица 2

**Физико-химические свойства донных отложений
оз. Нарочь и содержание в них хлорофилла, 2017 г.**

Table 2

**Physical and chemical properties of bottom sediments
of the lake Naroch and the content of chlorophyll, 2017**

Станция	Глубина станции, м	Содержание суммарного хлорофилла, мкг/г		Относительная влажность, %	Плотность, г/см ³	Органическое вещество, % в сухой массе
		Сразу после отбора проб	После хранения 1,5 мес.			
Трансекта 6						
N1	2,0	0,80	0,47	30,1 ± 0,3	2,04 ± 0,11	0,93 ± 0,77
N2	3,5	1,27	1,34	74,8 ± 0,8	1,26 ± 0,00	4,70 ± 0,05
N3	5,1	1,36	0,52	80,1 ± 1,1	1,05 ± 0,04	10,89 ± 0,08
N4	7,5	1,23	0,53	91,5 ± 3,8	1,14 ± 0,05	21,50 ± 0,43
Трансекта 7						
N5	2,2	1,20	0,97	32,4 ± 0,8	2,17 ± 0,04	0,95 ± 0,06
N6	4,3	0,63	0,78	71,0 ± 1,0	1,07 ± 0,01	6,12 ± 0,12
N7	6,2	3,63	2,45	82,5 ± 0,5	1,08 ± 0,01	4,24 ± 0,11
N8	8,0	2,65	1,91	89,4 ± 2,7	1,06 ± 0,03	23,26 ± 0,29
Трансекта 8						
N9	3,0	0,44	0,43	73,6 ± 5,5	1,22 ± 0,01	4,72 ± 1,01
N10	4,0	1,40	1,22	73,7 ± 1,9	1,08 ± 0,00	6,5 ± 1,10
N11	5,5	2,30	1,16	76,1 ± 0,3	1,04 ± 0,03	9,2 ± 0,80
N12	6,8	6,73	1,43	87,5 ± 0,4	1,10 ± 0,01	19,91 ± 0,27
N13	3,0	0,57	0,49	71,6 ± 0,5	1,26 ± 0,03	5,20 ± 0,20

Окончание табл. 2
Ending table 2

Станция	Глубина станции, м	Содержание суммарного хлорофилла, мкг/г		Относительная влажность, %	Плотность, г/см ³	Органическое вещество, % в сухой массе
		Сразу после отбора проб	После хранения 1,5 мес.			
Трансекта 9						
N14	2,0	1,15	0,74	80,1 ± 0,6	1,06 ± 0,02	7,38 ± 0,40
N15	4,0	1,56	2,04	82,0 ± 0,4	1,06 ± 0,02	9,67 ± 0,18
N16	5,0	2,77	1,82	87,4 ± 0,6	1,08 ± 0,01	20,6 ± 0,8
N17	8,0	2,33	1,23	89,8 ± 1,1	1,05 ± 0,01	24,98 ± 0,03

Таблица 3

Физико-химические свойства донных отложений оз. Мястро
и содержание в них хлорофилла, 2017 г.

Table 3

Physical and chemical properties of bottom sediments of the lake Myastro
and the content of chlorophyll, 2017

Станция	Глубина станции, м	Содержание суммарного хлорофилла, мкг/г		Относительная влажность, %	Плотность, г/см ³	Органическое вещество, % в сухой массе
		Сразу после отбора проб	После хранения 1,5 мес.			
Трансекта 1						
M1	3,1	1,50	0,80	70,9 ± 0,4	1,19 ± 0,01	5,31 ± 1,03
M2	4,7	5,30	3,88	76,6 ± 0,5	1,11 ± 0,02	7,34 ± 0,03
M3	5,6	2,18	2,17	81,6 ± 0,6	1,11 ± 0,01	10,84 ± 0,16
Трансекта 2						
M4	2,0	0,81	0,52	26,3 ± 0,4	2,03 ± 0,04	0,67 ± 0,13
M5	4,2	0,45	0,74	74,4 ± 2,2	1,15 ± 0,04	8,03 ± 1,38
M6	2,3	1,85	0,70	32,0 ± 1,0	1,89 ± 0,05	0,87 ± 0,06
Трансекта 3						
M7	3,6	1,40	1,10	76,0 ± 1,12	1,12 ± 0,04	6,09 ± 0,03
M8	4,5	1,46	1,89	77,1 ± 0,4	1,12 ± 0,03	7,64 ± 0,13
Трансекта 4						
M9	2,0	0,80	1,01	31,9 ± 1,7	1,88 ± 0,03	0,91 ± 0,04
M10	4,6	1,57	2,01	75,2 ± 0,6	1,07 ± 0,03	7,47 ± 0,22
M11	3,0	0,25	0,10	81,4 ± 0,7	1,04 ± 0,02	9,58 ± 1,43
Трансекта 5						
M12	1,9	2,50	2,57	29,9 ± 0,8	2,03 ± 0,07	0,93 ± 0,10
M13	4,5	2,65	2,80	79,2 ± 0,2	1,09 ± 0,01	7,42 ± 0,12

Пигментные индексы для индикации состояния водных экосистем на сегодняшний день используются редко, и в литературе содержится очень мало подобных сведений и методических рекомендаций, что усложняет возможность получить достоверные значения и провести их анализ. Для исследованных образцов донных отложений озер Нарочь и Мястро мы рассчитали известные из литературных источников пигментные индексы.

Исходя из анализа литературных источников [2; 5; 12; 14; 15] и наших данных, перспективных для получения информации о состоянии первичных продуцентов в водоемах, определены пигментные индексы E_{450}/E_{480} , E_{430}/E_{664} , E_{480}/E_{664} , E_{480}/E_{665} , $E_{480}/1,7E_{665K}$, E_{430}/E_{412} (табл. 4). Эти индексы рассчитываются

с помощью оптических плотностей ацетонового экстракта пигментов в областях длинно- и коротковолнового максимумов поглощения света хлорофиллом *a* (664; 665 и 430 нм) и коротковолновых максимумов для каротиноидов (430; 450 и 480 нм).

Таблица 4

Пигментные индексы донных отложений озер Нарочь и Мястро, 2016–2017 гг.

Table 4

The pigment indexes of bottom sediments of the lakes Naroch and Myastro, 2016–2017

Станция	E_{450}/E_{480}	E_{430}/E_{664}	E_{480}/E_{664}	E_{480}/E_{665}	$E_{480}/1,7E_{665к}$	E_{430}/E_{412}
S1	2,06	2,97	0,81	0,80	0,47	0,67
S3	1,54	2,65	1,27	1,25	0,80	0,80
S4	1,80	2,43	0,78	0,78	0,52	0,70
S7	1,93	2,42	0,69	0,68	0,47	0,62
S8	1,86	2,41	0,81	0,79	0,49	0,68
S9	1,42	2,71	1,44	1,41	0,90	0,72
S10	1,54	2,67	1,36	1,32	1,67	0,83
S11	1,42	2,76	1,44	1,42	0,67	0,70
S13	1,54	2,11	0,93	0,93	1,06	0,70
S14	1,56	3,24	1,47	1,46	0,87	0,76
S15	2,37	3,16	0,69	0,69	0,41	0,67
S16	2,41	2,65	0,60	0,60	0,40	0,67
S17	1,53	2,02	0,80	0,80	0,78	0,70
S18	1,76	3,14	1,14	1,15	0,72	0,70
S19	1,82	2,63	0,87	0,86	0,63	0,65
S20	1,61	2,33	0,86	0,86	0,66	0,78
S21	1,56	2,56	1,09	1,09	0,75	0,8
S22	1,95	2,62	0,84	0,84	0,75	0,71
S23	2,16	2,55	0,62	0,62	0,39	0,63
S24	1,77	2,48	0,83	0,82	0,28	0,66
S25	1,29	2,10	1,36	1,35	1,87	1,01
S26	1,44	2,46	1,28	1,26	0,88	0,8
S27	1,47	3,04	1,47	1,48	0,39	0,77
S28	1,27	1,44	0,88	0,86	2,78	0,81
S29	1,54	2,36	0,87	0,86	0,83	0,67
N1	1,32	3,51	2,46	2,46	0,46	1,05
N2	1,37	2,89	1,60	1,60	0,24	0,90
N3	1,44	3,18	1,73	1,77	0,07	0,86
N4	1,40	3,05	1,67	1,67	0,17	0,82
N5	1,29	5,36	3,29	3,37	0,38	0,97
N6	1,62	4,82	2,17	2,17	0,06	0,75
N7	1,56	3,53	1,76	1,74	0,42	0,75
N8	1,55	3,28	1,54	1,53	0,23	0,74
N9	1,38	4,80	3,13	3,36	0,24	0,84
N10	1,68	3,47	1,50	1,50	0,54	0,71
N11	1,49	3,13	1,59	1,59	0,31	0,73
N12	1,56	3,05	1,45	1,42	0,36	0,71

Окончание табл. 4
Ending table 4

Станция	E_{450}/E_{480}	E_{430}/E_{664}	E_{480}/E_{664}	E_{480}/E_{665}	$E_{480}/1,7E_{665k}$	E_{430}/E_{412}
N13	1,36	3,46	2,21	2,12	0,20	0,89
N14	1,42	2,73	1,47	1,45	0,17	0,74
N15	1,38	3,35	1,87	1,85	0,44	0,76
N16	1,50	2,94	1,43	1,41	0,48	0,70
N17	1,70	2,37	0,88	0,86	0,38	0,63
M1	1,34	4,00	2,69	2,69	0,37	0,89
M2	1,37	3,62	2,26	2,23	0,57	0,84
M3	1,27	4,74	3,46	3,47	0,69	0,87
M4	1,40	3,04	1,68	1,68	0,12	0,79
M5	1,45	3,16	1,63	1,63	0,10	0,71
M6	1,31	3,58	2,30	2,26	0,15	0,77
M7	1,49	5,35	2,96	2,91	0,63	0,79
M8	1,40	3,80	2,33	2,33	0,14	0,84
M9	1,39	4,59	2,77	2,91	0,14	0,81
M10	1,10	5,09	3,38	3,38	0,25	0,82
M11	0,84	3,08	3,08	3,08	0,04	0,77
M12	1,39	3,73	2,15	2,12	0,60	0,78
M13	1,36	3,82	2,27	2,21	0,82	0,77

Индекс E_{450}/E_{480} может быть использован как показатель степени развития различных отделов водорослей и цианобактерий. Согласно литературным данным [16] и собственным исследованиям значения указанного индекса выше 1 (1,14–14,6) характерны для дополнительных хлорофиллов и каротиноидов диатомовых и зеленых водорослей, а минимальные значения (около 1,0) характерны для желтых пигментов цианобактерий ввиду отсутствия хлорофиллов *b* и *c* и наличия специфических каротиноидов. В литературе [16] отмечается высокий коэффициент корреляции индекса E_{450}/E_{480} с долей цианобактерий в общей биомассе водорослей, что может быть использовано для выявления начальных этапов цветения водоемов. Это подтверждается нашими данными, полученными по р. Свислочи и ее водохранилищам в 2016 г., согласно которым существует обратная связь между значением индекса и степенью доминирования цианобактерий [17]. Для исследованных образцов донных отложений значение индекса E_{450}/E_{480} практически везде было больше 1,2 (1,27–2,41), что свидетельствует о доминировании пигментов зеленых и диатомовых водорослей. На двух станциях на оз. Мястро значение индекса было меньше 1,1, что говорит о наличии в этих образцах значительного количества пигментов цианобактерий. В целом для оз. Мястро средние значения индекса были ниже, что хорошо согласуется с литературными данными о более высоком содержании цианобактерий в составе фитопланктона этого озера по сравнению с оз. Нарочь [18].

Индексы E_{480}/E_{664} и E_{430}/E_{664} характеризуют соотношение общих каротиноидов и хлорофилла *a*. Считается, что повышение этих индексов свидетельствует об ухудшении физиологического состояния фитопланктона и увеличении его пигментного разнообразия [5; 16]. Если значение индексов ниже 1, то можно говорить о благоприятном состоянии водорослей, если пигментные индексы выше 1, то это свидетельствует о плохом физиологическом состоянии и снижении количества в фитопланктоне жизнеспособных активных клеток. По исследованным нами донным отложениям индекс E_{430}/E_{664} везде был выше 1 и изменялся от 2 до 5, что подтверждает отсутствие в донных отложениях значимого количества жизнеспособных клеток фитопланктона. Индекс E_{480}/E_{664} отражает баланс хлорофилла и каротиноидов в продуцентах водной экосистемы. В неблагоприятных условиях соотношение меняется в пользу каротиноидов. При этом отмечены более высокие значения для более трофного оз. Мястро.

Значения индекса E_{430}/E_{664} на всех исследованных станциях были в 2–3 раза выше, чем значения индекса E_{480}/E_{664} . Схожая ситуация наблюдалась при анализе спектральных индексов фитопланктона водоемов и водотоков, что позволяет предположить: баланс хлорофиллов и каротиноидов, характерный для фитопланктона, сохраняется и в донных отложениях. Значения индекса E_{430}/E_{664} не отличались для озер Нарочь и Мястро и составили в среднем $3,17 \pm 0,8$, в то время как индекс E_{480}/E_{664} в среднем был выше для оз. Мястро ($2,5 \pm 0,6$) по сравнению с оз. Нарочь ($1,4 \pm 0,6$).

Индексы E_{480}/E_{665} и $E_{480}/1,7E_{665к}$ также отражают соотношение каротиноидов и хлорофиллов. С помощью связи данных индексов с содержанием феопигментов можно оценить степень трансформации пигментов. При расчете индекса $E_{480}/1,7E_{665к}$ используется известное свойство хлорофилла уменьшать оптическую плотность при 665 нм в 1,7 раза в процессе превращения в феофитин под действием слабой кислоты. Слабая корреляция, прослеживаемая между этим индексом и удельным содержанием феопигментов в исследованных нами образцах, связана с тем, что везде хлорофилл в них разрушился в основном до феопигментов. Полученные данные по индексу $E_{480}/1,7E_{665к}$ были очень низкими (от 0,04 до 2,78) и в среднем в 1,9 раза меньше значения индекса E_{480}/E_{665} .

Таким образом, подчеркнем, что в литературе [1; 2; 16] встречаются 2 индекса – E_{480}/E_{664} и E_{480}/E_{665} , которые имеют почти аналогичные значения и характеристику. Так как пик хлорофилла *a* соответствует в длинноволновой области спектра длине волны 664 нм, то логичнее оставить для дальнейшего использования как в толще воды, так и в донных отложениях только индекс E_{480}/E_{664} . В нашем исследовании значения обоих индексов в 2016 г. изменялись от 0,6 до 1,5, в 2017 г. – от 0,8 до 3,4.

Еще один индекс E_{430}/E_{410} был предложен Б. Моссом [8] для анализа проб, содержащих большое количество феопигментов, однако мы предлагаем использовать скорректированный индекс E_{430}/E_{412} , поскольку в наших пробах максимум спектра поглощения в синей области приходится не на длину 410 нм, а на длину 412 нм. Этот индекс отображает изменения, которые происходят с молекулами хлорофилла при деградации, – сдвиг синего максимума спектра поглощения в более коротковолновую область. Соотношение оптических плотностей экстракта E_{430}/E_{412} соответствует соотношению хлорофиллов и феофитинов. В спектрах фитопланктона [12] во всех пробах значения светопоглощения на длине волны 430 нм были выше, чем на длине 412 нм. Значения индекса E_{430}/E_{412} , полученные для донных отложений наших озер, колебались от 0,62 до 1,05, следовательно, хлорофилл в пробах находился в основном в деградированном состоянии. Это подтверждается и данными по определению феопигментов в пробах, удельное содержание которых было 80–100 %.

Для контроля чистоты экстракта пигментов и правильности прописывания спектра светопоглощения нами были рассчитаны дополнительные индексы, предложенные ранее при расчете пигментных индексов фитопланктона разнотипных водных экосистем [12]. Мы выбрали несколько индексов, представленных в табл. 5. Индексы E_{664}/E_{720} , E_{430}/E_{720} и E_{412}/E_{720} показывают, во сколько раз длинно- и коротковолновые пики спектров поглощения хлорофилла *a* больше фонового значения чистоты экстракта (на 720 нм); при этом длине волны 664 нм соответствует максимальное поглощение хлорофилла *a* в длинноволновой области спектра, 430 нм – пик хлорофилла *a* в коротковолновой области спектра, 412 нм – максимальное значение для феофитина *a*.

Таблица 5

Пигментные индексы контроля чистоты экстракта донных отложений, 2016–2017 гг.

Table 5

The pigment indexes of control of the purity of the extract of bottom sediments, 2016–2017

Станция	E_{664}/E_{720}	E_{430}/E_{720}	E_{412}/E_{720}	E_{530}/E_{720}	E_{430}/E_{530}	E_{664}/E_{530}	E_{412}/E_{664}
S1	7,73	23,00	34,47	3,73	6,16	2,07	4,46
S3	7,89	20,89	26,06	3,39	6,16	2,33	3,30
S4	2,68	6,53	9,26	1,79	3,65	1,50	3,45
S7	8,67	21,00	33,75	3,42	6,15	2,54	3,89
S8	3,12	7,52	11,08	1,80	4,18	1,73	3,55
S9	4,56	12,36	17,24	2,52	4,90	1,81	3,78
S10	1,76	4,71	5,68	1,63	2,89	1,08	3,22
S11	12,90	35,60	50,60	6,30	5,65	2,05	3,92
S13	1,82	3,85	5,48	1,29	2,98	1,41	3,01
S14	3,64	11,78	15,44	2,67	4,42	1,36	4,24
S15	8,50	26,83	40,17	4,17	6,44	2,04	4,73
S16	6,86	18,14	27,00	3,00	6,05	2,29	3,94
S17	1,90	3,86	5,52	1,28	3,00	1,48	2,90
S18	11,00	34,60	49,40	5,20	6,65	2,12	4,49
S19	12,71	33,43	51,57	5,14	6,50	2,47	4,06

Окончание табл. 5
Ending table 5

Станция	E_{664}/E_{720}	E_{430}/E_{720}	E_{412}/E_{720}	E_{530}/E_{720}	E_{430}/E_{530}	E_{664}/E_{530}	E_{412}/E_{664}
S20	7,00	16,33	21,00	3,00	5,444	2,33	3,00
S21	2,28	5,84	7,34	1,68	3,48	1,36	3,22
S22	3,93	10,27	14,57	2,14	4,80	1,83	3,71
S23	9,08	23,17	36,58	3,58	6,46	2,54	4,03
S24	4,50	11,17	16,91	2,25	4,96	2,00	3,76
S25	1,10	2,32	2,29	1,36	1,70	0,81	2,08
S26	2,19	5,38	6,77	1,42	3,78	1,54	3,09
S27	11,50	35,00	45,50	5,00	7,00	2,30	3,96
S28	1,31	1,87	2,33	0,95	1,98	1,38	1,78
S29	2,89	6,84	10,21	2,32	2,95	1,25	3,53
N1	5,57	19,57	18,57	3,14	6,23	1,77	3,33
N2	12,00	34,75	38,50	4,50	7,72	2,67	3,21
N3	12,00	39,00	45,25	5,25	7,43	2,33	3,69
N4	7,20	22,00	26,80	3,40	6,47	2,12	3,72
N5	8,00	44,00	45,40	7,60	5,79	1,08	5,54
N6	8,50	41,00	54,50	4,00	10,25	2,12	6,41
N7	18,38	64,00	85,13	8,63	7,42	2,10	4,69
N8	26,00	84,50	114,75	11,25	7,51	2,29	4,46
N9	14,00	72,00	86,00	8,00	9,00	1,87	5,73
N10	38,00	132,00	185,00	16,00	8,25	2,37	4,87
N11	8,70	27,20	37,20	4,60	5,91	1,89	4,28
N12	28,25	84,62	118,50	11,50	7,36	2,41	4,27
N13	2,78	9,22	10,33	1,89	4,88	1,41	3,87
N14	5,60	15,00	20,40	2,90	5,17	1,89	3,71
N15	7,90	26,10	34,50	3,70	7,05	2,11	4,42
N16	17,25	50,00	71,50	7,25	6,90	2,35	4,21
N17	9,43	22,00	34,86	4,86	4,53	1,91	3,75
M1	7,57	30,28	34,00	4,43	6,84	1,71	4,49
M2	13,62	48,68	58,25	6,50	7,49	2,07	4,34
M3	14,50	68,75	79,25	9,00	7,64	1,61	5,47
M4	12,50	38,00	48,00	6,00	6,33	2,08	3,84
M5	9,50	30,00	42,50	5,00	6,00	1,90	4,47
M6	13,50	47,50	62,00	7,50	6,33	1,77	4,68
M7	8,83	46,33	58,83	5,50	8,42	1,58	6,79
M8	12,75	48,50	57,75	6,25	7,76	2,04	4,53
M9	3,50	16,83	20,83	3,00	5,61	1,22	5,68
M10	4,57	23,28	28,43	4,21	5,52	1,08	6,22
M11	2,00	6,17	8,00	1,83	3,36	1,09	4,00
M12	12,33	45,33	58,17	6,17	7,35	1,97	4,78
M13	14,60	54,20	70,00	7,80	6,95	1,82	4,93

Из табл. 5 видно, что во всех случаях значения индексов контроля чистоты экстракта больше 1. Наибольшее значение характерно для индекса E_{412}/E_{720} , что подтверждается максимальными данными по содержанию в пробах феофитинов.

Индекс E_{530}/E_{720} также используется для подтверждения правильности прописывания спектра. При длине волны 530 нм наблюдается спад спектра растительных пигментов ввиду того, что на этой волне

располагается переходная зона (зеленая и голубая), где практически нет светопоглощения, но значения индекса E_{530}/E_{720} здесь не должны быть ниже фонового значения 720 нм и, соответственно, указанный индекс не может быть ниже 1. Согласно полученным данным индекс E_{530}/E_{720} в среднем составил 6,5 (при колебаниях в диапазоне 1–16).

Индексы E_{430}/E_{530} и E_{664}/E_{530} показывают отношение содержания пика хлорофиллов a к величине спада в спектре поглощения. Значения этих индексов должны быть выше 1 и меньше значений индексов E_{664}/E_{720} , E_{430}/E_{720} .

Индекс E_{412}/E_{664} показывает, во сколько раз пик феофитина a в синей области спектра больше пика хлорофилла a в красной области. В настоящей работе по донным отложениям значение этого индекса в среднем составило 3,5 при колебаниях от 2,01 до 6,8.

Исходя из приведенных в табл. 5 индексов, определены нижние пороговые значения, позволяющие отбраковывать плохо прописанные спектры по критериям контроля чистоты экстракта. Так, для донных отложений предлагаются следующие нижние пороговые пределы пригодности пробы для анализа: $E_{664}/E_{720} - 2$, $E_{430}/E_{720} - 5$, $E_{412}/E_{720} - 5$, $E_{530}/E_{720} - 1,5$, $E_{430}/E_{530} - 3$, $E_{664}/E_{530} - 1,2$, $E_{412}/E_{664} - 2$.

Таким образом, проанализировав правильность прописанного спектра, можно сделать вывод о пригодности проб донных отложений для дальнейшего расчета пигментных индексов, отражающих важные характеристики первичных продуцентов в водоеме. После детального анализа спектров поглощения экстрактов пигментов донных отложений озер Нарочь и Мясстро некоторые пробы (S10, S13, S17, S25, S28, M11) оказались малопригодными для дальнейшего исследования и расчета пигментных индексов.

Спектральный анализ образцов донных отложений, проведенный на примере озер Нарочь и Мясстро, может оказаться ценным инструментом при изучении состояния водных объектов и качества воды.

Заключение

В результате проведенной работы проанализированы спектры поглощения в диапазоне длин волн 350–800 нм для донных отложений озер Нарочь и Мясстро. Установлено, что нет статистически значимой разницы между значениями светопоглощения на длинах волн 720 и 750 нм, что позволяет применять для анализа донных отложений более короткий спектральный ряд (аналогично ранее выполненной нами работе для фитопланктона).

В исследованных пробах отмечается высокая доля феопигментов в суммарном форбине (60–100 %). Содержание хлорофилла a (суммарного, без поправки на присутствие феопигментов) было невысоким: в 2016 г. в среднем оно составило 6,1 мкг/г, в 2017 г. – 1,85 мкг/г. Выявлено, что пробы должны быть обработаны сразу после их отбора или в течение нескольких дней после отбора, иначе количество хлорофилла снижается, а доля феопигментов возрастает и результаты становятся менее информативными.

Установлено, что нет связи между глубиной отбора донных отложений и содержанием в них хлорофилла a , а также удельным содержанием феопигментов в общем экстракте пигментов. Однако с глубиной снижается плотность донных отложений и закономерно увеличивается влажность и содержание органического вещества в сухой массе.

Проведены расчет пигментных индексов и оценка их значимости. Анализ пигментных индексов, отражающих физиологическое состояние фитопланктона, показал, что более информативными для работы с донными отложениями являются следующие: E_{450}/E_{480} , E_{480}/E_{664} , E_{430}/E_{664} , E_{430}/E_{412} . Предложены дополнительные индексы контроля чистоты экстракта, которые могут быть использованы как критерии качества исследуемой пробы. Для каждого индекса прописаны нижние пороговые значения.

Таким образом, пигментные индексы могут служить одним из интегральных параметров оценки качества воды, позволяющих проследить изменения в экосистемах вне зависимости от уровня их трофии и экологического состояния.

Библиографические ссылки

1. Сигарева ЛЕ, Тимофеева НА. Растительные пигменты в илах Иваньковского водохранилища как показатели деструкционных процессов. *Водные ресурсы*. 2003;30(3):346–356.
2. Сигарева ЛЕ. Хлорофилл в донных отложениях волжских водоемов. Москва: КМК; 2012.
3. Leavitt PR, Hodgson DA. Sedimentary Pigments. In: Smol JP, Birks HJ, Last WM (eds.) *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Volume 3: Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers; 2006. p.295–325. DOI: 10.1007/0-306-47668-1_15.
4. Минеева НМ. *Растительные пигменты в воде волжских водохранилищ*. Москва: Наука; 2004.
5. Станиславская ЕВ. Пигментные характеристики перифитона озерно-речных систем урбанизированных территорий. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2016;18(2-2):502–506.
6. ГОСТ 17.1.04.02.90. Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла a . Москва: ИПК Издательство стандартов; 2009.
7. СТБ 17.13.05-34. Охрана окружающей среды и природопользование. Аналитический контроль и мониторинг. Качество воды и определение концентрации хлорофилла a спектрофотометрическим методом. Минск: БелГИСС; 2014.

8. Moss B. A spectrophotometric method for the estimation of percentage degradation of chlorophylls to pheo-pigments in extracts of algae. *Limnology and Oceanography*. 1967;12(2):335–340. DOI: 10.4319/lo.1967.12.2.0335.
9. Бульон ВВ. Первичная продукция планктона внутренних водоемов. Ленинград: Наука; 1983.
10. *Determination of photosynthetic pigments in sea-water*. Monographs on Oceanologic Methodology. Paris: UNESCO; 1966. p.9–18.
11. Lorenzen CJ. Determination of chlorophyll and phaeopigments: spectrophotometric equations. *Limnology Oceanography*. 1967;12(2):343–346. DOI: 10.4319/lo.1967.12.2.0343.
12. Смольская ОС, Жукова АА. Спектральные пигментные индексы фитопланктона в разнотипных водных объектах Беларуси. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2018;1:113–123.
13. Мاستицкий СЭ. *Методическое пособие по использованию программы STATISTICA при обработке данных биологических исследований*. Минск: Институт рыбного хозяйства; 2009.
14. Сигарева ЛЕ, Ляшенко ОА. Значимость пигментных характеристик фитопланктона при оценке качества воды. *Водные ресурсы*. 2004;31(4):475–480.
15. Сулимова ОС, Жукова АА, Адамович БВ. Оценка связи спектральных характеристик пигментного состава фитопланктона и вклада синезеленых водорослей в его общую биомассу. В: *Біологічні дослідження – 2014: збірник трудов V Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів, 4–6 квітня 2014, Житомир, Україна*. Житомир: Видавництво Житомирського державного університету ім. І. Франка; 2014. с.221–223.
16. Сиделев СИ, Бабаназарова ОВ. Анализ связей пигментных и структурных характеристик фитопланктона высокоэвтрофного озера. *Journal of Siberian Federal University. Biology*. 2008;2(1):162–177.
17. Смольская ОС. Пигментные индексы, содержание сестона и хлорофилла *a* в русловых и зарегулированных участках р. Свислочь в районе г. Минска. В: *Биологическая осень – 2017: к Году науки в Беларуси: тезисы докладов Международной научной конференции молодых ученых, 9 ноября 2017, Минск, Беларусь*. Минск: БГУ; 2017. с.218–220.
18. Жукова ТВ, Михеева ТМ, Ковалевская РЗ. *Бюллетень экологического состояния озер Нарочь, Мясстро, Баторино (2015 год)*. Минск: БГУ; 2016.

References

1. Sigareva LYe, Timofeyeva NA. Plant pigments in the Ivankovo reservoir silts as indicators of destruction processes. *Vodnyye resursy*. 2003;30(3):346–356 (in Russ.).
2. Sigareva LYe. *Khlorofill v donnykh otlozheniyakh volzhskikh vodoemov* [Chlorophyll in bottom sediments of Volga reservoirs]. Moscow: KMK; 2012 (in Russ.).
3. Leavitt PR, Hodgson DA. Sedimentary Pigments. In: Smol JP, Birks HJ, Last WM (eds.) *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Volume 3: Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers; 2006. p.295–325. DOI: 10.1007/0-306-47668-1_15.
4. Mineyeva NM. *Rastitel'nye pigmenty v vode volzhskikh vodokhranilishch* [Vegetable pigments in the water of the Volga reservoirs]. Moscow: Nauka; 2004 (in Russ.).
5. Stanislavskaya EV. Pigment characteristics of periphyton at lake-river systems in urbanized territories. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*. 2016;18(2-2): 502–506 (in Russ.).
6. GOST 17.1.04.02.90. *Water. Spectrophotometric determination of chlorophyll a*. Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov; 2009 (in Russ.).
7. STB 17.13.05-34. *Environmental protection and nature use. Analytical control and monitoring. Water quality. Spectrometric determination of the chlorophyll a concentration*. Minsk: BelGISS; 2014 (in Russ.).
8. Moss B. A spectrophotometric method for the estimation of percentage degradation of chlorophylls to pheo-pigments in extracts of algae. *Limnology and Oceanography*. 1967;12(2):335–340. DOI: 10.4319/lo.1967.12.2.0335.
9. Bul'on VV. *Pervichnaya produktiya planktona vnutrennikh vodoemov*. Leningrad: Nauka; 1983 (in Russ.).
10. *Determination of photosynthetic pigments in sea-water*. Monographs on Oceanologic Methodology. Paris: UNESCO; 1966. p.9–18.
11. Lorenzen CJ. Determination of chlorophyll and phaeopigments: spectrophotometric equations. *Limnology Oceanography*. 1967;12(2):343–346. DOI: 10.4319/lo.1967.12.2.0343.
12. Smolskaya VS, Zhukava HA. Spectral pigment indices of phytoplankton in different water objects of Belarus. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2018;1:113–123 (in Russ.).
13. Mastitskii SE. *Metodicheskoe posobie po ispol'zovaniyu programmy STATISTICA pri obrabotke dannykh biologicheskikh issledovaniy* [Methodological manual on the use of the STATISTICA program in the processing of biological research data]. Minsk: Institut rybnogo khozyaistva; 2009 (in Russ.).
14. Sigareva LE, Lyashenko OA. Significance of pigment characteristics of phytoplankton in water quality estimating. *Vodnyye resursy*. 2004;31(4):475–480 (in Russ.).
15. Sulimova OS, Zhukova AA, Adamovich BV. Otsenka svyazi spektral'nykh kharakteristik pigmentnogo sostava fitoplanktona i vklada sinezelenykh vodoroslei v ego obshchuyu biomassu [Evaluation of the relationship between the spectral characteristics of the phytoplankton pigment composition and the contribution of blue-green algae to its general biomass]. In: *Biologichni doslidzhennja – 2014: zbornik trudov V vseukrayn'skoy naucho-praktycheskoy konferencyi molodykh uchennykh y studentov, 4–6 April 2014, Zhitomir, Ukraine*. Zhitomir: Zhytomyr Ivan Franko State University Publishing House; 2014. p.221–223 (in Russ.).
16. Sidelev SI, Babanazarova OV. Analiz svyazey pygmentnykh y strukturnykh kharakterystyk fytoplanktona vysokozyetrofnogo ozero [Analysis of pigment and structural characteristics of phytoplankton in a highly eutrophic lake]. *Journal of Siberian Federal University. Biology*. 2008;2(1):162–177 (in Russ.).
17. Smolskaya OS. Pigment indices and seston and chlorophyll *a* content in the Svisloch river and its reservoirs in Minsk city and suburbs. In: *Biologicheskaya osen' – 2017: k Godu nauki v Belarusi: tezisy dokladov Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii molodykh uchennykh, 9 noyabrya 2017, Minsk, Belarus*. Minsk: BSU; 2017. p.218–220 (in Russ.).
18. Zhukova TV, Mikheeva TM, Kovalevskaya RZ. *Byulleten' ekologicheskogo sostoyaniya ozer Naroch', Myastro, Batorino (2015 god)* [Bulletin of the ecological state of the lakes Naroch, Myastro, Batorino]. Minsk: BSU; 2016 (in Russ.).