



О.С. Смольская

*Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь*

## **ПИГМЕНТНЫЕ ИНДЕКСЫ $E_{450}/E_{480}$ И $E_{430}/E_{412}$ АВТОТРОФНОЙ КОМПОНЕНТЫ СЕСТОНА И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В ВОДОЕМАХ И ВОДОТОКАХ БЕЛАРУСИ**

**Аннотация.** Спектрофотометрический метод измерения хлорофилла позволяет без дополнительных затрат, используя пигментные индексы, получать ценную информацию о состоянии первичных продуцентов толщи воды и донных отложений всех типов водоемов вне зависимости от уровня их трофического статуса и состояния фитопланктона. Любая экосистема характеризуется определенным пигментным фоном в зависимости от присутствующих растительных сообществ, производящих первичную продукцию. Изменение пигментных характеристик происходит взаимосвязанно и сохраняет свою направленность в ходе сезонной и многолетней сукцессии сообществ продуцентов. Определение спектральных индексов в воде и донных отложениях дает возможность использовать их в качестве интегральных показателей при оценке экологического состояния водных объектов Беларуси. Наибольшую ценность и практическую значимость имеют индексы для оценки доли цианопрокариот в общей биомассе фитопланктона ( $E_{450}/E_{480}$ ) и доли феопигментов ( $E_{430}/E_{412}$ ) в суммарном хлорофилле-*a*. Рассчитаны и апробированы пигментные индексы, отражающие состояние первичных продуцентов:  $E_{450}/E_{480}$  и  $E_{430}/E_{412}$ . Выявлена тесная связь между индексом  $E_{450}/E_{480}$  и долей цианопрокариот в общей биомассе фитопланктона ( $r=-0,81$ ), на основании чего составлена шкала для примерной оценки доли цианопрокариот по величине индекса  $E_{450}/E_{480}$ . Значимая взаимосвязь наблюдалась также между индексом  $E_{430}/E_{412}$  и долей феопигментов в суммарном хлорофилле-*a* ( $r=-0,78$ ). Для каждого индекса рассчитан диапазон колебаний в зависимости от типа водного объекта и определены пороговые значения. На основании полученных пигментных характеристик для каждого исследованного водного объекта составлена база данных.

**Ключевые слова:** водотоки; водоемы; пигментные индексы; фитопланктон; донные отложения; феопигменты; первичные продуценты



Volha S. Smolskaya

*Belarusian State University, Nezavisimosti avenue, Minsk, Republic of Belarus*

## THE PIGMENT INDICES $E_{450}/E_{480}$ AND $E_{430}/E_{412}$ OF THE AUTOTROPHIC COMPONENT OF SESTON AND BOTTOM SEDIMENTS IN WATER BODIES AND STREAMS OF BELARUS

**Abstract.** The spectrophotometric method of measuring chlorophyll makes it possible, without additional costs, using pigment indices to obtain valuable information on the state of primary producers of the water column and bottom sediments of all types of water bodies, regardless of their trophic status and the state of phytoplankton. Any ecosystem is characterized by a certain pigment background, depending on the presence of plant communities that produce primary production. Changes in pigment characteristics occur interrelatedly and retain their direction in the course of seasonal and long-term succession of producer communities. The determination of spectral indices in water and bottom sediments makes it possible to use them as integral indicators in assessing the ecological state of water bodies in Belarus. The indices for assessing the share of cyanoprokaryotes in the total phytoplankton biomass ( $E_{450}/E_{480}$ ) and the share of pheopigments ( $E_{430}/E_{412}$ ) in total chlorophyll-a are of the greatest value and practical significance. Calculated and tested pigment indices reflecting the state of primary producers:  $E_{450}/E_{480}$  and  $E_{430}/E_{412}$ . A close relationship between the  $E_{450}/E_{480}$  index and the proportion of cyanoprokaryotes in the total phytoplankton biomass ( $r=-0.81$ ) was revealed, on the basis of which a scale was compiled for an approximate assessment of the proportion of cyanoprokaryotes by the value of the  $E_{450}/E_{480}$  index. A significant relationship was also observed between the  $E_{430}/E_{412}$  index and the proportion of pheopigments in total chlorophyll-a ( $r=-0.78$ ). For each index, the range of fluctuations was calculated depending on the type of water body, and threshold values were determined. Based on the obtained pigment characteristics, a database was compiled for each investigated water body.

**Keywords:** watercourses; reservoirs; pigment indices; phytoplankton; bottom sediments; pheopigments; primary producers

**Введение.** В настоящее время проблема оценки экологического состояния водных экосистем актуальна и относится к числу наиболее острых экологических проблем глобального уровня. Одной из серьезных опасностей является эвтрофирование водных объектов, которое приводит к чрезмерному развитию в них водорослей [1].



Фотосинтетические пигменты фитопланктона могут выступать в качестве индикаторных маркеров, отражающих процессы новообразования внутри водоемов и водотоков, миграции и трансформации органических веществ [2]. Понимание механизма взаимодействия продукционных и деструкционных процессов в разных водоемах достигается изучением содержания, состава и состояния растительных пигментов. Новообразованные при фотосинтезе органические вещества играют первостепенную роль в водных экосистемах. Пигментные характеристики фитопланктона можно рассматривать как интегральные показатели, что подтверждается сходством генезиса пигментов и органических веществ в водоемах и одновременное участие этих веществ в деструкции — синхронность гидрологических и биологических процессов [2; 3].

Хлорофиллы, каротиноиды и фикобилипротеины присутствуют во всех фотосинтезирующих водорослях, но не у большинства бактерий, простейших или детрита, что позволяет отличать фитопланктон от других компонентов микробного сообщества. Многие пигменты ограничены для определенных классов или даже родов, что позволяет использовать таксономический состав фитопланктона на уровне класса. Пигменты флуоресцентны на видимых длинах волн, что позволяет их обнаруживать, они лабильные и быстро деградируют после смерти клетки, тем самым можно различать живые клетки от стареющих [2; 4].

Однако, фотосинтетические пигменты имеют несколько недостатков в качестве маркеров. Их лабильность означает, что для сохранения пигментов необходимо использовать особые условия, поскольку они чувствительны к воздействию света, тепла, кислорода, кислот и щелочей, а также спонтанно образуют семейства изомеров в растворе. Их выражение является переменным, даже в пределах определенного класса, а содержание на клетку зависит от факторов окружающей среды, таких как освещенность и содержание питательных веществ (азот, фосфор) [2].

Хлорофилл, находящийся в фотосинтетических мембранах, может служить своего рода природным датчиком состояния клеток водорослей и высших растений. При нарушении состояния фотосинтетических мембран под действием внешнего фактора происходят определенные изменения количества и состава хлорофиллов и их производных, и, как следствие, их оптических свойств, которые и служат источником ин-



формации для экспресс-диагностики состояния клеток [5]. Кроме того, по содержанию продуктов распада хлорофилла-*a* можно судить о физиологическом состоянии сообщества, так как при гибели клетки фотосинтетически активный хлорофилл в течение нескольких часов разлагается до феофитина [3, 6].

Каротиноиды являются лабильными молекулами, способными спонтанно перестраиваться в растворе, что обычно создает дополнительные пики, которые усложняют анализы. Спектры поглощения каротиноидов обычно имеют три пика (в зависимости от используемого растворителя), обозначенные I, II и III от коротких до длинных длин волн. Часто пики I и III сводятся к плечам или полностью скрываются путем перекрытия пиков из-за интерференции функциональных групп с каротиноидом хромофора. Форма и положение пиков различаются в разных растворителях и полезны при идентификации [2].

Отношение общих каротиноидов к хлорофиллу-*a* может служить показателем физиологического состояния клеток фитопланктона. Процессы деградации различаются между хлорофиллами и каротиноидами. Так, каротиноиды превращаются в цис-каротиноиды, а затем в бесцветные соединения путем расщепления конъюгированной (диеновой) системы. Каротиноиды более стабильный компонент пигментной системы, чем хлорофилл-*a*. Разрушение последнего происходит следующим образом: молекула хлорофилла в процессе сбора и экстрагирования под действием кислой среды утрачивает фитол и превращается в хлорофиллид, а затем, теряя атом Mg, — феофорбид, или хлорофилл утрачивает сразу атом Mg и превращается в феофитин [2, 7].

Поэтому при старении популяции фитопланктона и при неблагоприятных воздействиях факторов среды, которые способствуют деструкции хлорофилла-*a*, величина отношения общих каротиноидов к хлорофиллу-*a* возрастает. Содержание каротиноидов и их отношение к хлорофиллу-*a* изучают и по отношению к различным классам водорослей. Изменение этого соотношения с глубиной может быть следствием адаптации фитопланктона к качественному составу света. Отношение общих каротиноидов к хлорофиллу-*a* при разных условиях колеблется в широких пределах [2, 7, 8].

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. В частности, в коротковолновой области спектра поглощения установлено отличие синезеленых водорослей от других групп, и на этой основе разработан способ оценки качества воды по пигментному индексу  $E_{450}/E_{480}$  [9].

Таким образом, спектрофотометрический анализ пигментов в общем экстракте благодаря простоте и доступности широко используется для изучения продуктивности автотрофных сообществ, в том числе фитопланктона разнотипных водоемов и водотоков [10]. Соотношения концентраций пигментов, получаемые при спектрофотометрическом анализе, служат показателями физиологического состояния, структуры и таксономического разнообразия фитопланктонного сообщества вне зависимости от уровня трофического статуса водного объекта. На основании анализа экстракта исследователь получает данные о доминирующей группе фотосинтетических пигментов и может судить о состоянии водной экосистемы в целом.

**Материалы исследования.** В основу работы положены результаты исследований, выполненных в 2010–2019 гг. на 10 реках (Западная Двина, Вилия, Дисна, Смердия, Уша, Цна, Голбица, Нача, Нежлевка, Свислочь), 35 озерах Национального парка «Нарочанский», 4 водохранилищах (Чижевское, Заславское, Дрозды, Комсомольское озеро) и прудах 7 рыбоводческих хозяйств («Вилейка», «Селец», «Изабелино», «Новинки», «Навлица», «Грицево», «Свислочь») Беларуси. Всего за время исследования было отобрано 647 проб воды, каждая из которых обработана в трех повторностях. Также в 2016–2018 гг. было обработано 114 проб донных отложений, собранных на разных глубинах озер Нарочь, Мястро и Баторино.

Отбор проб воды проводился с подповерхностного горизонта либо на глубоководных станциях батометром. Отбор образцов донных отложений проводили с использованием керноотборника на глубинах 1,5–16 м. Содержание взвешенного вещества в воде определяли гравиметрическим методом, осаждая взвесь на ядерные фильтры с диаметром пор 1 мкм. Для оценки хлорофилла применяли спектрофотометрический метод в ацетоновых экстрактах [11, 12] с учетом вклада феофигментов. При статистической обработке данных использовали программные пакеты *Microsoft Excel* и *Statistica Trial 13*. Для характеристики структурных показателей сообществ рассчитывали арифметическую среднюю для определенной выборки ( $n$ ) и стандартное отклонение (SD). Зафиксированные пробы воды для определения таксономичес-



кого состава и биомассы фитопланктона обрабатывали по методике, описанной Т.М. Михеевой.

В результате проведенной работы были проанализированы спектры поглощения в диапазоне длин волн 350–800 нм для разнотипных водных объектов, отобранные в разные периоды вегетационного сезона. При грамотном подходе пигментные индексы могут быть использованы в качестве одного из параметров оценки качества воды для всех типов водоемов и водотоков вне зависимости от уровня их трофии и состояния фитопланктона.

Перспективными для получения информации о состоянии первичных продуцентов в водоемах и водотоках, определены пигментные индексы:  $E_{450}/E_{480}$  и  $E_{430}/E_{412}$ . Данные индексы были рассчитаны исходя из оптических плотностей ацетонового экстракта пигментов в областях длинно- и коротковолнового максимумов поглощения света хлорофиллом-*a* и коротковолновых максимумов для каротиноидов [11, 13, 14].

При проведении спектрального анализа для каждого приготовленного экстракта были получены первичные данные, которые переносились в созданную на основе собственных наблюдений базу данных. И только после обработки полученных значений был проведен расчет спектральных пигментных индексов.

Индекс  $E_{450}/E_{480}$  используется как показатель степени развития отдельных отделов водорослей и цианобактерий. Значения указанного индекса выше 1 (1,14–14,6), согласно литературным данным [15] и собственным исследованиям (1,15–2,0), характерны для дополнительных хлорофиллов и каротиноидов диатомовых и зеленых водорослей, а минимальные значения (около 1,0) для желтых пигментов цианобактерий ввиду отсутствия хлорофиллов-*b* и -*c* и наличия специфических каротиноидов. В литературе [15] отмечается высокий коэффициент корреляции  $E_{450}/E_{480}$  с долей цианобактерий в общей биомассе водорослей, что может быть использовано для выявления начальных этапов цветения водоемов. В работе проведен расчет данного индекса и приведены (при наличии биомассы) коэффициенты корреляции с долей цианобактерий, зеленых и диатомовых водорослей в общей биомассе фитопланктона.

Индекс  $E_{430}/E_{410}$  был предложен Б. Моссом [16] для анализа проб, содержащих большое количество феопигментов. Однако мы предлагаем использовать скорректированный индекс —  $E_{430}/E_{412}$ , поскольку по



результатам анализа массива данных в наших пробах максимум спектра поглощения в синей области приходится не на длину 410 нм, а на 412 нм. Данная ситуация возможно объясняется тем, что Мосс выполнял свои исследования в 1967 г., промеряя спектр с шагом 5–10 нм (в нашей работе — шаг составляет 1 нм), соответственно невозможно точно было определить точный максимум пика каротиноидов [16]. Индекс  $E_{430}/E_{412}$  отображает изменения, которые происходят с молекулами хлорофилла при деградации — сдвиг синего максимума спектра поглощения в более коротковолновую область. Соотношение оптических плотностей экстракта  $E_{430}/E_{412}$  отражает соотношение хлорофиллов и фео-опигментов в пробе.

Таким образом, соблюдается прямая связь между относительным содержанием фео-пигментов в общем форбине (хлорофилл+фео-пигменты) и величиной индекса  $E_{430}/E_{410}$ . Верхнее отношение, соответствующее фотосинтетически активному хлорофиллу-*a*, колеблется для различных популяций фитопланктона в узких границах — от 1,39 до 1,47 при средней 1,44. Если проба представлена чистым хлорофиллом-*a* в 90 % ацетоне, то соотношение индекса — 1,205. Нижнее отношение  $E_{430}/E_{410}$  (для подкисленных экстрактов) колеблется в более широких пределах — 0,45–0,8. Оно определяется присутствием каротиноидных пигментов, значительно отличающихся от хлорофилла-*a* удельным погашением света. Соотношение индекса для чистого феофитина-*a* в 90 % ацетоне составляет примерно 0,15 [16].

**Результаты исследования.** Для того, чтобы проследить, как работают пигментные индексы состояния первичных продуцентов, был проведен общий анализ спектров поглощения пигментов для исследованных водоемов и водотоков. В целом, анализ изменения пигментного фона является очень ценной характеристикой состояния водной экосистемы и может применяться для мониторинговых наблюдений [17].

**Реки.** В нашей работе первые пигментные спектры поглощения и расчеты пигментных индексов состояния первичных продуцентов были получены в пробах за осенний период 2012 г. для крупной реки Вилюя и малых рек (Смердия, Цна, Уша). Результаты представлены в табл. 1. В 2013 г. пигментные индексы уже были рассчитаны по всему массиву данных за вегетационный сезон по всем исследованным рекам (Вилюя, Западная Двина, Дисна, Смердия, Цна, Уша, Голбица, Нежлевка, Нача). Сезонная динамика изменения индексов состояния первичных продуцентов в реках также отражена в табл. 1.



Пигментный индекс  $E_{450}/E_{480}$  в осенний период за 2 года исследованный был выше 1,6, что может свидетельствовать о доминировании в пробах воды зеленых и диатомовых водорослей. В летний период значение индекса было наименьшее.

И в 2012, и в 2013 г. значения индекса  $E_{430}/E_{412}$  изменяются в одинаковом диапазоне (0,9–1,1), несколько снижаясь к осени, что дает основания предположить о преобладании в этот период в пробах фотосинтетически активного хлорофилла над феопигментами.

Согласно полученным данным, значения пигментных индексов состояния первичных продуцентов колебались в небольших пределах вне зависимости от категории реки (большая или малая). В сезонном аспекте значения индекса  $E_{450}/E_{480}$  в летний период были наименьшими. Более высокие значения для индекса  $E_{430}/E_{412}$  отмечены в весенне-летний период.

Для исследованного массива данных по водотокам определены пределы колебания значений индексов ( $n=70$ ), составившие соответственно:  $E_{450}/E_{480}$  — от 1,03 до 2,20;  $E_{430}/E_{412}$  — от 0,86 до 1,24.

*Таблица 1. Пигментные индексы состояния первичных продуцентов в реках северо-запада Беларуси: осень 2012 г, весна-осень 2013 г.*

*Table 1. The pigment indices of the state of primary producers in the rivers of the north-west of Belarus: autumn 2012, spring-autumn 2013*

Индекс	Сезон	Виляя	Западная Двина	Дисна	Малые реки
$E_{450}/E_{480}$	Осень	1,63±0,29	—	—	1,62±0,30
	Весна	1,59±0,21	1,42±0,40	1,31±0,25	1,92±0,10
	Лето	1,38±0,24	1,28±0,11	1,08±0,01	1,14±0,12
	Осень	—	2,00±0,13	1,81±0,04	1,85±0,07
$E_{430}/E_{412}$	Осень	1,07±0,02	—	—	1,00±0,08
	Весна	1,03±0,03	1,01±0,04	1,04±0,06	1,08±0,11
	Лето	1,11±0,07	1,01±0,02	0,97±0,01	1,04±0,11
	Осень	—	0,93±0,04	0,91±0,01	0,97±0,04

**Река Свислочь и ее водохранилища.** Развитие автотрофной компоненты на исследованном отрезке, в русловых участках реки Свислочь и расположенных на ней водохранилищах (прибрежная зона от канала переброски воды из Вилейской водной системы до русловых участков в районе микрорайоны Шабаны), рассматривалось по результатам наблюдений в летний сезон. Осредненные значения пигментных индексов  $E_{450}/E_{480}$  и  $E_{430}/E_{412}$  по месяцам приведены в табл. 2.



Значения индекса  $E_{430}/E_{412}$  соответствует преобладающему содержанию фотосинтетически активного хлорофилла-*a* с невысоким присутствием каротиноидных пигментов — величина индекса в среднем составила  $0,9 \pm 0,2$ , что хорошо сопоставимо с данными по удельному содержанию феопигментов в пробах — около 15 %. Пределы колебания данного индекса в период исследования от 0,6 до 1,2.

**Таблица 2. Пигментные индексы состояния первичных продуцентов в речных участках и водохранилищах р. Свислочь, 2016 г.**

**Table 2. The pigment indices of the state of primary producers in river sections and reservoirs of the river. Svisloch, 2016**

Дата отбора	$E_{450}/E_{480}$	$E_{430}/E_{412}$
Июнь	$1,77 \pm 0,16$	$1,05 \pm 0,11$
Июль	$1,41 \pm 0,19$	$0,75 \pm 0,10$
Август	$1,28 \pm 0,16$	$0,94 \pm 0,21$

По результатам наблюдений была обнаружена значимая связь пигментного индекса  $E_{450}/E_{480}$  со структурными показателями фитопланктона. Коэффициент корреляции между индексом  $E_{450}/E_{480}$  и долей синезеленых водорослей в общей биомассе (Вс-з/Вобщ) составил  $r = -0,81$  ( $n = 18$ ).

Для сравнения был проведен анализ по выявлению связи между пигментным индексом  $E_{450}/E_{480}$  и долей синезеленых водорослей в общей численности организмов и общей численности клеток. Коэффициент корреляции индекса  $E_{450}/E_{480}$  получился меньше по обоим параметрам, сохраняя обратную направленность связи, и составил: с долей синезеленых водорослей в общей численности организмов  $r = -0,64$ , клеток —  $r = -0,65$ .

Таким образом, мы выявили сильную отрицательную связь индекса  $E_{450}/E_{480}$  с долей синезеленых водорослей в общей биомассе и, напротив, положительную корреляцию данного индекса с долей зеленых (Вз/Вобщ)  $r = 0,72$  и диатомовых (Вд/Вобщ)  $r = 0,73$ . Направленности связей свидетельствуют об уменьшении значений индекса  $E_{450}/E_{480}$  при возрастании степени доминирования цианопрокариот, повышение величин индекса сигнализирует о значительном вкладе в биомассу фитопланктона диатомовых и зеленых водорослей. Подобная тенденция подтверждается и литературными данными [15]. Пределы колебания данного индекса в период исследования в летний сезон составили 1,1–1,9.

**Озера.** В летние месяцы 2017–2018 гг. были исследованы 32 озера Национального парка «Нарочанский» [18], где наряду с содержанием



взвешенного вещества и хлорофилла-*a*, проводили анализ спектральных характеристик автотрофной компоненты сестона. Полученные значения анализируемых индексов были сопоставлены с уровнем трофического статуса исследованных озер Национального парка «Нарочанский» (табл. 3).

Таблица 3. Пигментные индексы состояния первичных продуцентов озер Национального парка «Нарочанский», 2017–2018 гг.

Table 3. The pigment indices of the state of primary producers of the lakes of the Narochansky National Park, 2017–2018

Трофический статус водоема	$E_{450}/E_{480}$	$E_{430}/E_{412}$
Олиготрофный	1,41±0,27	1,02±0,29
Мезотрофный	1,48±0,22	1,08±0,09
Эвтрофный	1,46±0,23	1,08±0,15

Для исследованных образцов воды озер Национального парка «Нарочанский» значения индекса  $E_{450}/E_{480}$  практически везде были больше 1,2 (1,14–3,00), что может свидетельствовать о преобладании в большинстве проб пигментов зеленых и диатомовых водорослей. Также необходимо отметить, что средние значения индекса  $E_{450}/E_{480}$  вне зависимости от трофического статуса водоема составили 1,45 [17, 19, 20].

Значения индекса  $E_{430}/E_{412}$ , полученные для озер Национального парка «Нарочанский», колебались от 0,59 до 1,29 (1,07±0,12), свидетельствуя, что в большей части проб преобладал фотосинтетически активный хлорофилл, за исключением нескольких образцов. Выявлена связь между значением индекса  $E_{430}/E_{412}$  и долей феопигментов. Коэффициент корреляции  $r=-0,63$  ( $n=43$ ). Примечательно, что медианная доля феопигментов в пробе соответствует значению индекса равному 1, что можно использовать для экспресс-анализа степени деградации хлорофилла в пробе (если  $E_{430}/E_{412} < 1$ , то доля феопигментов составляет менее 50 %).

В целом, колебания индексов состояния первичных продуцентов для озер различного трофического статуса незначительны, однако разброс значений уменьшается по всем индексам с увеличением трофности, что также свидетельствует о большей репрезентативности индексов в водах с более высоким удельным содержанием пигментов.

**Пруды рыбоводческого хозяйства «Вилейка».** Пигментные индексы состояния первичных продуцентов в прудах рыбоводческого хозяйства «Вилейка» ( $n=56$ ) характеризуются симметричным распределением



значений относительно средних, низким значением коэффициента вариации (7–23%) и низким стандартным отклонением (0,1–0,2). Результаты изменения пигментных индексов по месяцам представлены в табл. 4.

**Таблица 4. Пигментные индексы состояния первичных продуцентов прудов рыбоводческого хозяйства «Вилейка», 2014 г и 2015 г.**

**Table 4. The pigment indices of the state of primary producers of ponds of the Vileyka fish farm, 2014 and 2015**

Месяц (объем выборки)	$E_{450}/E_{480}$	$E_{430}/E_{412}$
2014 г.		
Май (6)	1,48±0,19	1,13±0,03
Июнь (9)	1,24±0,12	1,19±0,03
Июль (18)	1,44±0,19	1,16±0,08
Август (18)	1,29±0,08	1,16±0,09
Сентябрь (5)	1,47±0,02	1,18±0,03
Общее (56)	1,37±0,17	1,16±0,07
2015 г.		
Апрель (5)	1,86±0,21	0,95±0,04
Май (10)	1,58±0,06	0,92±0,03
Июнь(20)	1,33±0,17	1,10±0,06
Июль (20)	1,30±0,12	1,15±0,06
Август (20)	1,27±0,07	1,24±0,04
Сентябрь (16)	1,22±0,13	1,21±0,05
Общее (91)	1,35±0,20	1,13±0,12

Значения индекса  $E_{430}/E_{412}$  соответствуют преобладающему содержанию фотосинтетически активного хлорофилла-*a* с невысоким присутствием каротиноидных пигментов — величина индекса в среднем составила 1,16±0,07, что хорошо сопоставимо с данными по удельному содержанию феопигментов в общем содержании хлорофилла и его производных (в среднем 17 %). Индекс  $E_{430}/E_{412}$  демонстрирует сильную отрицательную связь с долей феопигментов в суммарном форбине. Коэффициент корреляции составил -0,93 (n=56). Для экспресс-анализа состояния фитопланктона в прудах также можно считать благоприятными значения <1.

По результатам наблюдений была обнаружена значимая связь пигментного индекса  $E_{450}/E_{480}$  со структурными показателями фитопланктона. Коэффициент корреляции между индексом  $E_{450}/E_{480}$  и долей синезеленых водорослей в общей биомассе (Вс-з/Вобщ) составил  $r=-0,81$  (n=12).



Таким образом, в прудах рыбхоза «Вилейка» выявлена сильная отрицательная связь индекса  $E_{450}/E_{480}$  с долей синезеленых водорослей в общей биомассе и, напротив, положительная корреляция данного индекса с долей зеленых (Вз/Вобщ)  $r=0,61$  и диатомовых (Вд/Вобщ)  $r=0,44$ . Подобная тенденция подтверждается и литературными данными [15].

Результаты изменения пигментных индексов контроля чистоты экстрактов и состояния первичных продуцентов прудов рыбоводческого хозяйства «Вилейка» за 2015 г. по месяцам отбора проб представлены в табл. 4.

Значения индекса  $E_{430}/E_{412}$  также соответствует преобладающему содержанию фотосинтетически активного хлорофилла-*a* — величина индекса составила  $1,13 \pm 0,12$ , что хорошо сопоставимо с данными по удельному содержанию феопигментов. Индекс  $E_{430}/E_{412}$  имеет сильную отрицательную связь с долей феопигментов в суммарном форбине. Коэффициент корреляции составил  $r=-0,81$  ( $n=91$ ).

По результатам наблюдений была обнаружена значимая связь пигментного индекса  $E_{450}/E_{480}$  со структурными показателями фитопланктона. Коэффициент корреляции между индексом  $E_{450}/E_{480}$  и долей диатомовых водорослей в общей биомассе (Вд/Вобщ) составил  $r=0,54$  ( $n=19$ ), однако с долей синезеленых водорослей в общей биомассе была выявлена слабая корреляция  $r=0,32$  ( $n=19$ ).

Диапазон колебаний индекса  $E_{450}/E_{480}$  по исследованным водным объектам составил  $1,07-1,82$ , индекса  $E_{430}/E_{412}$  —  $0,93-1,29$ .

**Пруды и отдельные водоемы, используемые для рыбоводства.** Значения пигментного индекса  $E_{450}/E_{480}$  колебались от  $0,97$  до  $1,86$ , в среднем —  $1,36 \pm 0,24$ , что свидетельствует о содержании дополнительных хлорофиллов и каротиноидов, присущих диатомовым и зеленым водорослям и отсутствующих у цианопрокариот (для которых значения индекса близки к 1). Коэффициент вариации — 17%. На отдельных станциях отбора проб было определено содержание биомассы фитопланктона. Проведен корреляционный анализ для индекса  $E_{450}/E_{480}$  и структурных характеристик фитопланктона: выявлена сильная отрицательная связь  $r=-0,81$  ( $n=19$ ) индекса  $E_{450}/E_{480}$  с долей синезеленых водорослей в общей биомассе, положительная  $r=0,77$  индекса  $E_{450}/E_{480}$  с долей зеленых водорослей в общей биомассе. Сопоставив данные по биомассе и индексу  $E_{450}/E_{480}$ , в отдельных исследованных прудах и высокопродуктивных водоемах была выявлена потенциальная опасность для разведения рыбы (особенно в 2014 г.). Благодаря своевременному мониторингу



с использованием пигментных индексов, опасность была ликвидирована, путем применения технологических мероприятий.

Значения пигментного индекса  $E_{430}/E_{412}$  колебались от 0,94 до 1,31, составив в среднем  $1,10 \pm 0,08$ . Коэффициент вариации также небольшой — 8 %. Индекс  $E_{430}/E_{412}$  имеет сильную отрицательную связь с долей феопигментов в суммарном форбине. Коэффициент корреляции составил  $r = -0,82$  ( $n = 45$ ).

**Система прудов рыбоводческих хозяйств в водоисточниках (на входе) и в водоприемниках (на сбросе).** Пигментные индексы в пробах, собранных на входе и сбросе системы прудов четырех рыбоводческих хозяйств, расположенных на северо-западе Беларуси, были рассчитаны для данных за 2013 г. (табл. 5).

Таблица 5. Изменения пигментных индексов состояния первичных продуцентов на входе и сбросе в системе прудов рыбоводческих хозяйств, 2013 г.

Table 5. The pigment indices of the state of primary producers at the input and output in the system of ponds of fish farms, 2013

Индексы	Вилейка		Грицево		Навлица		Новинки	
	до	после	до	после	до	после	до	после
$E_{450}/E_{480}$	1,63	1,10	1,18	1,73	1,81	1,65	1,91	1,80
$E_{430}/E_{412}$	0,98	1,24	0,98	1,04	0,93	1,03	0,92	0,86

Индекс  $E_{450}/E_{480}$  на всех створах был выше 1,1, что может свидетельствовать о доминировании в прудах рыбхозаов зеленых и датомовых водорослей. Причем величины индекса четко различались на входе и сбросе: в рыбхозе «Вилейка» на сбросе значение индекса  $E_{450}/E_{480}$  было в 1,5 ниже, чем на входе, а в рыбхозе «Грицево» наоборот — выше на сбросе в 1,5 раза.

Индекс  $E_{430}/E_{412}$  на трех рыбхозах (за исключением рыбхоза «Новинки») увеличивался на сбросе по сравнению со входом, причем доля феопигментов изменялось в обратном порядке, что говорит об отрицательной зависимости между этими показателями. Коэффициент корреляции составил  $r = -0,50$ .

**Донные отложения.** Пигментный состав донных отложений озер дает интегральную характеристику состояния водных экосистем в период, предшествующий исследованию. Для озер Нарочь, Мястро и Баторино нами были рассчитаны пигментные индексы состояния первичных продуцентов [21]. В табл. 6 приведены общие показатели по каждому озеру отдельно и суммарно для трех озер.



Таблица 6. **Вариабельность пигментных индексов состояния первичных продуцентов в донных отложениях Нарочанских озер, 2016–2018 гг.**  
Table 6. **The variability of pigment indices of the state of primary producers in the bottom sediments of the Naroch lakes, 2016–2018**

Показатель		$E_{450}/E_{480}$	$E_{430}/E_{412}$
Нарочь (42 станции)	Среднее значение $\pm$ SD	1,61 $\pm$ 0,27	0,76 $\pm$ 0,09
	Минимум-максимум	1,27–2,41	0,62–1,05
Мястро (13 станций)	Среднее значение $\pm$ SD	1,31 $\pm$ 0,17	0,80 $\pm$ 0,05
	Минимум-максимум	0,84–1,49	0,71–0,89
Баторино (8 станций)	Среднее значение $\pm$ SD	1,49 $\pm$ 0,15	0,89 $\pm$ 0,05
	Минимум-максимум	1,24–1,65	0,84–0,96
Общее по всем озерам (63 станции)	Среднее значение $\pm$ SD	1,53 $\pm$ 0,27	0,78 $\pm$ 0,09
	Минимум-максимум	0,84–2,41	0,62–1,05

Для исследованных образцов донных отложений значение индекса  $E_{450}/E_{480}$  практически везде было больше 1,2 (1,27–2,41), что свидетельствуют 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 данными литературы о более высоком содержании цианопрокариот в составе фитопланктона этого озера в сравнении с оз. Нарочь [22]. Средние и медианные значения индекса  $E_{450}/E_{480}$  оказались очень близкими (1,53 и 1,49 соответственно) в общей выборке для всех озер, такая же тенденция прослеживается и по группам озер. Коэффициент вариации индекса для трех озер был небольшим (от 10 % для оз. Баторино до 17 % в оз. Нарочь).

Значения индекса  $E_{430}/E_{412}$ , полученные для донных отложений исследованных 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 %.

**Вертикальное распределение в озере Нарочь.** Озеро Нарочь является объектом многолетних наблюдений, именно поэтому изучение спектрального анализа растительных пигментов вертикального распределения было проведено именно тут, на станции многолетних наблюдений. Наличие данных исследований прошлых лет (например, таксономического состава и биомассы фитопланктона) дало нам возможность более детального объяснения полученных результатов.



Значения индекса  $E_{450}/E_{480}$  составили  $1,29 \pm 0,04$ , что свидетельствует о наличии в экстрактах пигментов донных отложений дополнительных хлорофиллов и каротиноидов диатомовых и зеленых водорослей [15], что подтверждают и данные мониторинга о таксономическом составе фитопланктона [23]. Вариабельность данного индекса составила  $1,19-1,45$ , подтверждая изменения в небольших пределах относительно средней.

Индекс  $E_{430}/E_{412}$  составил в среднем по выборке  $0,80 \pm 0,03$ , изменяясь от  $0,72$  до  $0,87$ . Согласно литературным данным [16] значения индекса в пределах  $0,45-0,80$  определяются присутствием в донных отложениях большого количества каротиноидных пигментов. В свою очередь, анализом пигментных индексов по глубине колонки подтверждается тот факт, что каротиноидные пигменты дольше сохраняются по сравнению с производными хлорофилла.

Связь между индексами состояния первичных продуцентов и глубиной залегания слоя донных отложений слабая и отрицательная, более детально это прослеживается на рис. 1.

Согласно полученному графику до 10 см глубины в донных осадках прослеживается четкая тенденция к снижению индекса  $E_{450}/E_{480}$ , далее с увеличением глубины слоя отмечены незначительные колебания. У индекса  $E_{430}/E_{412}$ , наоборот, до 10 см прослеживается увеличение значений, потом с 11 до 35 см наблюдается тенденция к уменьшению, с 35 см — к увеличению значений индекса.

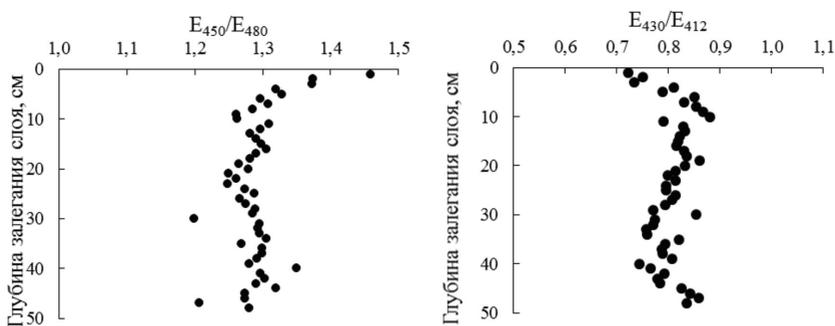


Рис. 1. Распределение значений пигментных индексов в зависимости от глубины залегания слоя донных отложений в пелагиали оз. Нарочь

Fig. 1. The distribution of pigment index values depending on the depth of the layer of bottom sediments in the pelagial of the lake Naroch



Согласно полученным данным, распределения донных отложений в поверхностном 5-см слое донных отложений на разных глубинах оз. Нарочь [24], среднее содержание хлорофилла в донных отложениях в исследованных образцах было примерно таким же, как при изучении вертикального распределения в колонке донных отложений. Осредненные значения пигментных индексов донных отложений схожи при обоих вариантах распределения мест сбора донных осадков в озере. Следовательно, пигментный состав экстрактов донных отложений существенно не изменяется в зависимости от глубины станции сбора пробы и высоты колонки донного грунта [24].

Таким образом, проведен анализ спектров поглощения пигментов в аспекте вертикального распределения в колонке донных отложений. Рассчитаны пигментные индексы ( $E_{450}/E_{480}$ ,  $E_{430}/E_{412}$ ), отражающие долговременные тренды в развитии продуцентов в экосистеме, в первую очередь, фитопланктона. Показано, что и содержание фотосинтетических пигментов, и индексы с глубиной изменяются нелинейно. Содержание пигментов в верхнем 5-см слое донных отложений отображают относительно недавний производственный уровень экосистемы, а также качественные изменения, происходящие с пигментами в верхнем слое донных грунтов, в то время как содержание продуктов распада хлорофилла по глубине колонки донных отложений отражает уровень развития фитопланктона в долгосрочном историческом срезе, в том числе пропуская пик развития фитопланктона, достигавшего максимальных значений в период эвтрофирования в озере в 1970–1980-х гг.

**Заключение.** Оптические плотности экстрактов первичных продуцентов на разных длинах волн спектра поглощения могут косвенно отражать соотношения концентраций пигментов и служить показателями физиологического состояния, структуры и таксономического разнообразия фитопланктонного сообщества. Это характерно как для проб воды из разнотипных водоемов (озера, водохранилища, пруды) и водотоков (реки), так и для донных отложений.

В качестве общего резюме можно отметить, что значения пигментных индексов, характеризующих состояние первичных продуцентов в водной толще, не зависят от трофического статуса водного объекта (табл. 7). Осредненные значения анализируемых индексов  $E_{450}/E_{480}$  и  $E_{430}/E_{412}$  для всех исследуемых водных объектов приведены в табл. 7.



**Таблица 7. Значения пигментных индексов состояния первичных продуцентов  $E_{450}/E_{480}$  и  $E_{430}/E_{412}$  для исследованных массивов данных**  
**Table 7. The values of pigment indices of the state of primary producers  $E_{450}/E_{480}$  and  $E_{430}/E_{412}$  for the studied datasets**

Водный объект	$E_{450}/E_{480}$	$E_{430}/E_{412}$
Виляя	1,53±0,23	1,07±0,04
Западная Двина	1,45±0,08	0,98±0,03
Дисна	1,40±0,05	0,97±0,03
Малые реки	1,64±0,08	1,02±0,09
Свислочь	1,50±0,27	0,91±0,19
Олиготрофные озера	1,41±0,27	1,02±0,29
Мезотрофные озера	1,48±0,22	1,08±0,09
Эвтрофные озера	1,46±0,23	1,08±0,15
Пруды	1,36±0,20	1,13±0,09
Донные отложения озер, верхний 5-см слой	1,53±0,27	0,78±0,09
Донные отложения оз. Нарочь, 50-см слой	1,29±0,04	0,80±0,03

По результатам анализа массива наших наблюдений была обнаружена значимая связь пигментного индекса  $E_{450}/E_{480}$  со структурными показателями фитопланктона. Индекс  $E_{450}/E_{480}$  отражает удельный вклад цианопрокариот в общую биомассу фитопланктона на фоне других отделов водорослей (диатомовых и зеленых), и может применяться для экспресс-оценки долевого участия в ней указанных отделов — коэффициент корреляции между индексом  $E_{450}/E_{480}$  и долей синезеленых водорослей в общей биомассе (Вс-з/Вобщ) составил  $r=-0,81$  ( $n=50$ ) (рис. 2 (А)). Напротив, положительная корреляция данного индекса выявлена с долей зеленых (Вз/Вобщ)  $r=0,62$  и диатомовых (Вд/Вобщ)  $r=0,53$ . Подобная тенденция подтверждается и литературными данными [9, 15]. Диапазон колебаний данного индекса в исследованных нами образцах воды составил 1,14–3,0.

На основании анализа зависимости значений пигментного индекса  $E_{450}/E_{480}$  от содержания цианопрокариот в общей биомассе водорослей была составлена соответствующая шкала (табл. 8), для примерной оценки доли цианопрокариот по величине индекса  $E_{450}/E_{480}$ .

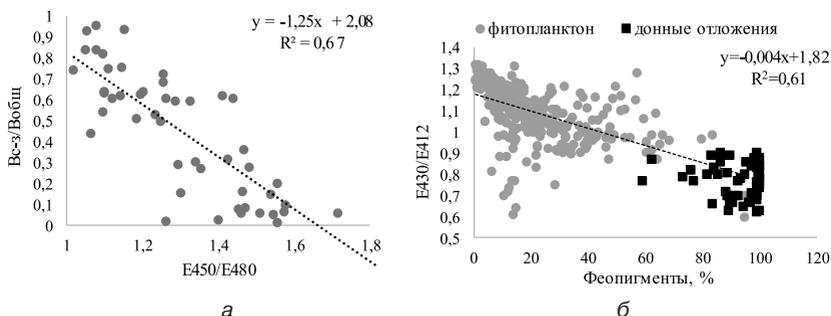
Высокие значения индекса  $E_{430}/E_{412}$  соответствуют преобладающему содержанию фотосинтетически активного хлорофилла-*a* для проб фитопланктона толщи воды, а для донных отложений, наоборот, отмечены низкие значения, указывающие на присутствие продуктов деграда-

ции хлорофилла. Индекс  $E_{430}/E_{412}$  имеют сильную отрицательную связь с долей феопигментов в суммарном форбине (рис. 2 (Б)). Коэффициент корреляции составил  $r=-0,78$  ( $n=380$ ), диапазон колебаний для всего массива данных составил 0,6–1,3.

**Таблица 8. Примерная оценка доли цианопрокариот в общей биомассе фитопланктона в водных объектах по значениям пигментного индекса  $E_{450}/E_{480}$**

**Table 8. The approximate assessment of the proportion of cyanoprokaryotes in the total biomass of phytoplankton in water bodies according to the values of the pigment index  $E450/E480$**

$E_{450}/E_{480}$	<1,0	1,1–1,19	1,2–1,29	1,3–1,39	1,4–1,49	1,5–1,59	1,6–1,69	1,7–1,79	≥1,8
$V_{c-3}/V_{общ}$	100–70	70–60	60–50	40–50	30–40	20–30	10–20	до 10	~ 0



**Рис. 2. Связь пигментного индекса  $E_{450}/E_{480}$  с долей цианопрокариот в общей биомассе фитопланктона (А) и связь пигментного индекса  $E_{430}/E_{412}$  с долей феопигментов в исследованных водных объектах (Б)**

**Fig. 2. The correlation between the  $E_{450}/E_{480}$  pigment index and the proportion of cyanoprokaryotes in the total phytoplankton biomass (A) and the relationship between the  $E_{430}/E_{412}$  pigment index and the proportion of pheopigments in the studied water bodies (B)**

Таким образом, определены наиболее информативные индексы, которые могут лечь в основу нового метода, что значительно упростит и ускорит диагностику состояния фитопланктона в водных экосистемах. Полученные материалы могут быть применимы как в программах долговременных наблюдений за состоянием водных объектов, так и для целей быстрой диагностики их состояния (например, для оценки в прудовых хозяйствах доли цианобактерий, которые являются продуцентами опасных токсинов и имеют низкую пищевую ценность как пищевой ресурс).

**Список использованных источников**

1. Limnological analyses / ed.: R.G. Wetzel, G.E. Likens. — 3rd ed. — New York : Springer-Verlag, 2000. — 429 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3250-4>.
2. Wright, S. W. Pigment markers for phytoplankton production / S.W. Wright, S.W. Jeffrey // Marine organic matter: biomarkers, isotopes and DNA / ed. J.K. Volkman. — Heidelberg, 2006. — Vol. 2. — P. 71–104. [https://doi.org/10.1007/698\\_2\\_003](https://doi.org/10.1007/698_2_003).
3. Пырина, И.Л. Содержание пигментов фитопланктона как показатель современного состояния Рыбинского водохранилища / И.Л. Пырина, Л.Е. Сигарева // Актуальные проблемы экологии Ярославской области : материалы третьей науч.-практ. конф. / Верхневолж. отд-ние Рос. экол. акад. — Ярославль, 2005. — Вып. 3, т. 1. — С. 270–274.
4. Ляшенко, О.А. Растительные пигменты как показатели биомассы фитопланктона в мелководном эвтрофном озере / О.А. Ляшенко // Проблемы регион. экологии. — 2004. — № 5. — С. 6–14.
5. Хлорофиллы. Спектр поглощения [Электронный ресурс] // Экология : справочник. — Режим доступа: <https://ru-ecology.info/term/68178>. — Дата доступа: 18.05.2019.
6. The use of sedimentary algal pigments to infer historic algal communities in Lake Aropka, Florida / M. N. Waters [et al.] // J. of Paleolimnology. — 2005. — Vol. 33. — P. 53–71. <https://doi.org/10.1007/s10933-004-1691-7>
7. Бульон, В.В. Первичная продукция планктона внутренних водоемов / В.В. Бульон ; отв. ред. Г.Г. Винберг. — Л. : Наука, Ленингр. отд-ние, 1983. — 150 с. — (Труды Зоологического института / Акад. наук СССР ; т. 98).
8. Pigments in surface sediments of South American shallow lakes as an integrative proxy for primary producers and their drivers / T. Buchaca [et al.] // Freshwater Biology. — 2019. — Vol. 64, № 8. — P. 1437–1452. <https://doi.org/10.1111/fwb.13317>.
9. Сигарева, Л.Е. Хлорофилл в донных отложениях волжских водоемов / Л.Е. Сигарева. — М. : Т-во науч. изд. КМК, 2012. — 217 с.
10. Минеева, Н.М. Растительные пигменты в воде волжских водохранилищ / Н.М. Минеева. — М. : Наука, 2004. — 156 с.
11. Lorenzen, C.J. Determination of chlorophyll and pheopigments spectrophotometric equations / C. J. Lorenzen // Limnology a. Oceanography. — 1967. — Vol. 12, № 2. — P. 343–346. <https://doi.org/10.4319/lo.1967.12.2.0343>.
12. Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла-а : ГОСТ 17.1.4.02-90. — Введ. 01.01.91. — М. : Изд-во стандартов, 1999. — 10 с.
13. Jeffrey, S. W. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton / S. W. Jeffrey, G. F. Humphrey // Biochemie u. Physiologie der Pflanzen. — 1975. — Vol. 167, № 2. — P. 191–194. [https://doi.org/10.1016/S0015-3796\(17\)30778-3](https://doi.org/10.1016/S0015-3796(17)30778-3).
14. A red-shifted chlorophyll / M. Chen [et al.] // Science. — 2010. — Vol. 329, № 5997. — P. 1318–1319. <https://doi.org/10.1126/science.1191127>.
15. Сиделев, С.И. Анализ связей пигментных и структурных характеристик фитопланктона высокоэвтрофного озера / С.И. Сиделев, О.В. Бабаназарова // Журн. Сиб. федер. ун-та. Сер. Биология. — 2008. — Т. 1, № 2. — P. 162–177.



16. Moss, B. A spectrophotometric method for the estimation of percentage degradation of chlorophylls to pheo-pigments in extracts of algae / B. Moss // *Limnology and Oceanography*. — 1967. — Vol. 12, № 2. — P. 335–340. <https://doi.org/10.4319/lo.1967.12.2.0335>.
17. Смольская, О.С. Спектральные пигментные индексы фитопланктона в разнотипных водных объектах Беларуси / О.С. Смольская, А.А. Жукова // *Журн. Белорус. гос. ун-та. Экология*. — 2018. — № 1. — С. 113–123.
18. Экологическая система Нарочанских озер / Белорус. гос. ун-т; под ред. Г.Г. Винберга. — Минск: Университетское, 1985. — 302 с.
19. Связь спектральных характеристик пигментного состава и структурных показателей фитопланктона р. Свислочь / Т.М. Михеева [и др.] // *Журн. Белорус. гос. ун-та. Экология*. — 2018. — № 4. — С. 42–51.
20. Смольская, О.С. Спектральные характеристики автотрофной компоненты взвешенного вещества в озерах Национального парка «Нарочанский» / О.С. Смольская, А.А. Жукова, Б.В. Адамович // *Докл. Нац. акад. наук Беларуси*. — 2019. — Т. 63, № 3. — С. 325–330. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-325-330>.
21. Смольская, О.С. Пигментные и физико-химические характеристики донных отложений озер Нарочь и Мястро / О.С. Смольская, А.А. Жукова, А.А. Люля // *Журн. Белорус. гос. ун-та. Биология*. — 2018. — № 2. — С. 65–77.
22. Многолетние изменения индекса трофического состояния Нарочанских озер и его связь с основными гидроэкологическими параметрами / Б.В. Адамович [и др.] // *Вод. ресурсы*. — 2016. — Т. 43, № 5. — С. 535–543. <https://doi.org/10.7868/S0321059616050023>
23. The dynamics of freshwater phytoplankton stability in the Naroch Lakes (Belarus) / T. M. Mikheyeva [et al.] // *Ecological Indicators*. — 2017. — Vol. 81. — P. 481–490. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.05.054>
24. Смольская, О.С. Вертикальное распределение производных хлорофилла и пигментные индексы в донных отложениях оз. Нарочь / О.С. Смольская, А.А. Жукова // *Пойменные и дельтовые биоценозы Голарктики: биологическое многообразие, экология и эволюция: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Астрахань, 13–18 мая 2019 г. / Астрах. гос. ун-т; ред.: В.Н. Пилипенко, С.Р. Кособокова*. — Астрахань, 2019. — С. 152–158.

## References

1. Wetzel R.G., Likens G.E. (eds.). *Limnological analyses*. 3rd ed. New York, Springer-Verlag, 2000. 429 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3250-4>
2. Wright S.W., Jeffrey S.W. Pigment markers for phytoplankton production. *Marine organic matter: biomarkers, isotopes and DNA*. Heidelberg, 2006, vol. 2, pp. 71–104. [https://doi.org/10.1007/698\\_2\\_003](https://doi.org/10.1007/698_2_003).
3. Pyrina I.L. The content of phytoplankton pigments as an indicator of the current state of the Rybinsk reservoir. *Aktual'nye problemy ekologii Yaroslavskoi oblasti:*



- materialy tret'ei nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Actual problems of ecology of the Yaroslavl region: materials of the third scientific-practical conference]. Yaroslavl, 2005, iss. 3, vol. 1, pp. 270–274 (in Russian).
4. Lyashenko O.A. Plant pigments as indicators of phytoplankton biomass in a shallow eutrophic lake. *Problemy regional'noi ekologii = Regional Environmental Issues*, 2004, no. 5, pp. 6–14 (in Russian).
  5. Chlorophyll: absorption spectrum. *Ecology: reference book*. Available at: <https://ru-ecology.info/term/68178> (accessed 18.05.2022) (in Russian).
  6. Waters M.N., Schelske C.L., Kenney W.F., Chapman A.D. The use of sedimentary algal pigments to infer historic algal communities in Lake Apopka, Florida. *Journal of Paleolimnology*, 2005, vol. 33, pp. 53–71. <https://doi.org/10.1007/s10933-004-1691-7>.
  7. Bul'on V.V. *Primary production of plankton of inland water bodies. Proceedings of the Zoological Institute Academy of Sciences of the USSR. Vol. 98*. Leningrad, Nauka Publ., 1983. 150 p. (in Russian).
  8. Buchaca T., Kosten S., Lacerot G., Mazzeo N., Kruk C., Huszar V.L., Lotter A. F., Jeppesen E. Pigments in surface sediments of South American shallow lakes as an integrative proxy for primary producers and their drivers. *Freshwater Biology*, 2019, vol. 64, no. 8, pp. 1437–1452. <https://doi.org/10.1111/fwb.13317>.
  9. Sigareva L.E. *Chlorophyll in bottom sediments of the Volga reservoirs*. Moscow, KMK Scientific Press Ltd., 2012. 217 p. (Russian).
  10. Mineeva N.M. *Plant pigments in the water of the Volga reservoirs*. Moscow, Nauka Publ., 2004. 156 p. (Russian).
  11. Lorenzen C.J. Determination of chlorophyll and phaeopigments: spectrophotometric equations. *Limnology and Oceanography*, 1967, vol. 12, no. 2, pp. 343–346. <https://doi.org/10.4319/lo.1967.12.2.0343>.
  12. State Standartd 17.1.04.02-90. *Water. The method of spectrophotometric determination of chlorophyll-a*. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1999. 10 p. (in Russian).
  13. Jeffrey S.W., Humphrey G.F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls *a*, *b*, and *c* in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochemie und Physiologie der Pflanzen*, 1975, vol. 167, no. 2, pp. 191–194. [https://doi.org/10.1016/S0015-3796\(17\)30778-3](https://doi.org/10.1016/S0015-3796(17)30778-3).
  14. Chen M., Schliep M., Willows R.D., Cai Z.-L., Neilan B.A., Scheer H. A red-shifted chlorophyll. *Science*, 2010, vol. 329, no. 5997, pp. 1318–1319. <https://doi.org/10.1126/science.1191127>.
  15. Sidelev S.I., Babanazarova O.V. The link analysis of the pigmentary and structural characteristics of the high-eutrophic lake phytoplankton. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Biologiya = Journal of Siberian Federal University. Biology*, 2008, vol. 1, no. 2, pp. 162–177 (in Russian).
  16. Moss B.A. spectrophotometric method for the estimation of percentage degradation of chlorophylls to pheo-pigments in extracts of algae. *Limnology and Oceanography*, 1967, vol. 12, no. 2, pp. 335–340. <https://doi.org/10.4319/lo.1967.12.2.0335>.
  17. Smolskaya V.S., Zhukova A.A. Spectral pigment indices of phytoplankton in different water objects of Belarus. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya = Journal of the Belarusian State University. Ecology*, 2018, no. 1, pp. 113–123 (in Russian).



18. Vinberg G.G. (ed.). *Ecological system of the Naroch lakes*. Minsk, Universitetskoe Publ., 1985. 302 p. (in Russian).
19. Mikheeva T.M., Smolskaya V.S., Savich I.V., Zhukava H.A. Coupling of spectral characteristics of pigmental composition and structural indicators of phytoplankton in Svisloch river. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya = Journal of the Belarusian State University. Ecology*, 2018, no. 4, pp. 42–51 (in Russian).
20. Smolskaya O.S., Zhukova A.A., Adamovich B.V. Spectral characteristics of the autotrophic component of suspended matter in the lakes of the national park “Narochansky”. *Doklady Natsional’noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 3, pp. 325–330 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-325-330>.
21. Smolskaya O.S., Zhukova A.A., Lyulya A.S. Analysis of pigment, physical and chemical characteristics of bottom sediments in lakes Naroch and Myastro. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya = Journal of the Belarusian State University. Biology*, 2018, no. 2, pp. 65–77 (in Russian).
22. Adamovich B.V., Zhukova T.V., Mikheeva T.M., Kovalevskaya R.Z., Lukyanova E.V. Long-term variations of the trophic state index in the narochanskies lakes and its relation with the major hydroecological parameters. *Water Resources*, 2016, vol. 43, no. 5, pp. 809–817. <https://doi.org/10.1134/s009780781605002x>.
23. Mikheyeva T.M., Parparov A., Adamovich B.V., Gal G., Lukyanova E.V. The dynamics of freshwater phytoplankton stability in the Naroch lakes (Belarus). *Ecological Indicators*, 2017, vol. 81, pp. 481–490. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.05.054>
24. Smolskaya O.S., Zhukova A.A. Vertical distribution of chlorophyll derivatives and pigment indices in the bottom sediments of the lake Naroch. *Poimennye i del’tovye biotsenozy Golarktiki: biologicheskoe mnogoobrazie, ekologiya i evolyutsiya: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Astrakhan’, 13–18 maya 2019 g.* [Floodplain and delta biocenoses of the Holarctic: biological diversity, ecology and evolution: proceedings of the international scientific and practical conference, Astrakhan, May 13–18, 2019]. Astrakhan, 2019, pp. 152–158 (in Russian).

### Сведения об авторах

Ольга Сергеевна Смольская — кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры зоологии биологического факультета, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: sylimova\_1991@mail.ru

### Information about the authors

Volha S. Smolskaya — Ph.D. (Biology), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Zoology, Faculty of Biology, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Av., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sylimova\_1991@mail.ru