

СВЯЗЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПИГМЕНТНОГО СОСТАВА И СТРУКТУРНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФИТОПЛАНКТОНА Р. СВИСЛОЧЬ

Т. М. МИХЕЕВА¹⁾, О. С. СМОЛЬСКАЯ¹⁾, И. В. САВИЧ¹⁾, А. А. ЖУКОВА¹⁾

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

Исследования на р. Свислочь были направлены на изучение количественных и качественных характеристик автотрофной компоненты планктона, а также поиск их связи с данными спектрального анализа пигментного состава. Показано, что для характеристики структурных показателей фитопланктона могут применяться пигментные индексы: E_{450}/E_{480} , E_{480}/E_{664} , E_{430}/E_{664} , E_{430}/E_{412} , отражающие состояние планктонных продуцентов в экосистеме. В ходе предварительного анализа были рассчитаны вспомогательные пигментные индексы контроля чистоты экстракта и четкости прописанного спектра: E_{664}/E_{720} , E_{430}/E_{720} , E_{530}/E_{720} , E_{430}/E_{530} и E_{664}/E_{530} . Выявлена тесная обратная связь индекса E_{450}/E_{480} и доли цианобактерий в общей биомассе фитопланктона ($r = -0,81$) и, напротив, положительная корреляция данного индекса с долей зеленых ($r = 0,72$) и диатомовых водорослей ($r = 0,73$).

Ключевые слова: р. Свислочь; пигментные индексы; спектры поглощения; структура фитопланктона; цианобактерии.

Благодарность. Исследование выполнено в рамках задания «Связь количественных и качественных показателей формирования органического вещества (ОВ) водохранилищ и нижележащих речных участков водотоков с некоторыми оптическими характеристиками водных объектов» подпрограммы «Радиация и природные системы» государственной программы научных исследований (ГПНИ) «Природопользование и экология» на 2016–2020 гг.

COUPLING OF SPECTRAL CHARACTERISTICS OF PIGMENTAL COMPOSITION AND STRUCTURAL INDICATORS OF PHYTOPLANKTON IN SVISLOCH RIVER

T. M. MIKHEEVA^A, V. S. SMOLSKAYA^A, I. V. SAVICH^A, H. A. ZHUKAVA^A

^ABelarusian State University,
Nezavisimosti avenue, 4, 220030, Minsk, Belarus
Corresponding author: V. S. Smolskaya (sylimova_1991@mail.ru)

Studies on the River of Svisloch were aimed at assessing the quantitative and qualitative characteristics of the autotrophic component of plankton, as well as the search for their correlation with the data of the spectral analysis of the pigment

Образец цитирования:

Михеева Т. М., Смольская О. С., Савич И. В., Жукова А. А. Связь спектральных характеристик пигментного состава и структурных показателей фитопланктона р. Свислочь // Журн. Белорус. гос. ун-та. Экология. 2018. № 4. С. 42–51.

For citation:

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. J. Belarus. State Univ. Ecol. 2018. No. 4. P. 42–51. (in Russ.).

Авторы:

Тамара Михайловна Михеева – доктор биологических наук, доцент; главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории гидроэкологии.

Ольга Сергеевна Смольская – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории гидроэкологии.

Ирина Васильевна Савич – научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории гидроэкологии.

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

Authors:

Tamara M. Mikheeva, doctor of science (biology), associate professor; chief researcher of the research laboratory of aquatic ecology.

mikheyeva@tut.by

Volha S. Smolskaya, junior researcher at the research laboratory of aquatic ecology.

sylimova_1991@mail.ru

Iryna V. Savich, researcher of the research laboratory of aquatic ecology.

savich_i_v@tut.by

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

anna_eco@tut.by

composition. It is shown that pigment indices E450/E480, E480/E664, E430/E664, E430/E412 can be used to characterize the structural indicators of phytoplankton, and therefore reflect the state of planktonic producers in the ecosystem. Also, during the preliminary analysis, auxiliary pigment indices of extract purity and clarity of the prescribed spectrum were calculated: E664/E720, E430/E720, E530/E720, E430/E530 and E664/E530. A close interrelation was found between the index E450/E480 and the share of cyanobacteria in the total phytoplankton biomass ($r = -0,81$), and, on the contrary, the positive correlation of this index with the share of green algae ($r = 0,72$) and diatoms ($r = 0,73$).

Key words: Svisloch River; pigment indices; absorption spectrum; phytoplankton's structure; cyanobacteria.

Acknowledgment. The study was carried out in the frames of the task «The connection of quantitative and qualitative indicators of the organic matter formation in reservoirs and underlying river sections of watercourses with some optical characteristics of water objects» of the «Radiation and Natural Systems» subprogram of the State Program for Scientific Research (SPSR) «Nature Management and Ecology» on 2016–2020.

Введение

Методы оценки водорослевой компоненты на основании свойств фотосинтетических пигментов активно используются в гидробиологических исследованиях, поскольку они являются специфичными для растительного материала. Обычно по количеству пигментов оценивают уровень развития фитопланктона, однако более пристальный анализ спектров поглощения экстракта пигментов и расчеты соответствующих пигментных индексов могут дать важную информацию о составе фитопланктона и его состоянии [1]. В данной работе на примере р. Свислочь рассматривается возможность по характеру спектра поглощения света пигментами определять некоторые важные структурные показатели фитопланктона, в частности, развитие потенциально токсичных цианопрокариот.

Река Свислочь – главная водная магистраль г. Минска – пример небольшого водотока, подверженного высокой антропогенной нагрузке. Неоднократно на отдельных ее участках возникают непрогнозируемые отрицательные явления, в частности, интенсивное «цветение» воды цианобактериями, характерное для прибрежных территорий. Организация оперативного контроля экологического состояния реки и других водных объектов могла бы позволить быстро оценить масштаб и глубину возникающих нарушений функционирования экосистемы. Анализ спектральных характеристик воды является удобным и быстрым инструментом, позволяющим оценить ряд параметров, обуславливающих качество воды и экологическое состояние водных объектов разного типа (уровень развития фитопланктона и некоторые его структурные показатели, содержание в воде органических веществ и др.) [2].

Материалы и методы исследования

Пробы воды в русловых участках р. Свислочь и расположенных на ней водохранилищах отбирали в летние месяцы в прибрежной зоне на 9 станциях: канале переброски воды из Вилейской водной системы (1), на водохранилищах (Заславское (2), Дрозды (3 и 4), Комсомольское озеро (6), Чижовское (8)) и русловых участках в районах футбольного манежа (5), ул. Аранская (7) и микрорайона Шабаны (9). Схема расположения станций представлена на рис. 1.

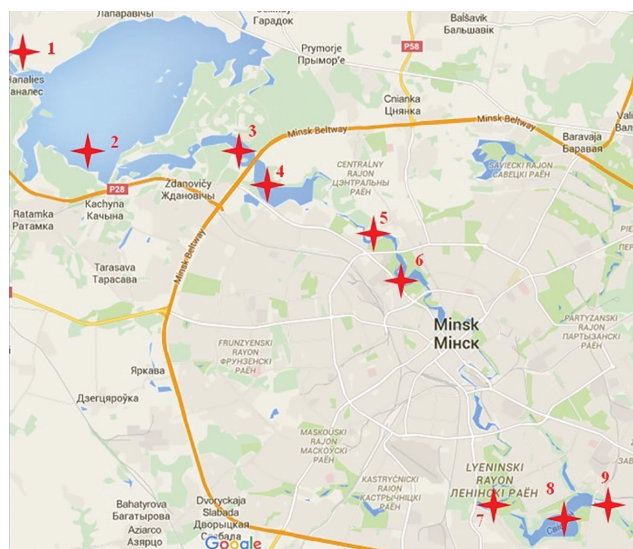


Рис. 1. Картограмма расположения станций забора проб на речных участках и водохранилищах р. Свислочь

Fig. 1. The sampling map in the river sections and reservoirs of Svisloch R.

В отобранных пробах воды оценивали количественное развитие фитопланктона и долевого вклад основных отделов водорослей в общую численность и биомассу прямым микроскопическим методом. Для оценки уровня развития фитопланктона (включая цианобактерии) использовали традиционные методы гидробиологии – осадочный метод и световую микроскопию. Пробы объемом 0,5 л фиксировали по Утермелю в модификации [3]. Видовой состав и количественный учет представителей фитопланктона приводится на основании камеральной обработки количественных проб в световом микроскопе *Zeiss Axiostar*. Для подсчета фитопланктона использовали камеру Фукса–Розенталя ёмкостью 3,2 мм³. Оценку биомассы организмов проводили «методом истинных объемов» [4], приравнивая клетку или организм к определенным геометрическим фигурам [5; 6]. Размеры клеток и организмов измеряли под микроскопом с помощью окуляр-микрометра. Удельный их вес принимали равным единице. Общую биомассу фитопланктона находили суммированием биомасс отдельных представителей. Численность (плотность) фитопланктона выражали в количестве клеток (число одноклеточных водорослей, число клеток в нитях и колониях) и организмов в литре (кл./л, орг./л), биомассу (в расчете на сырое вещество) – в мг/л.

Для прописывания спектров поглощения пигментов фитопланктона измеряли оптическую плотность ацетоновых экстрактов взвеси, осажденной на ядерные мембранные фильтры диаметром пор 1 мкм при фильтрации нативной воды. Промеры проводили с помощью приложения *Scan* спектрофотометра *Caq* 50 в диапазоне длин волн 350–800 нм с шагом 1 нм [1].

При расчете пигментных индексов, используемых для оценки структуры сообщества фитопланктона, применяли пигментные индексы, опубликованные в литературных источниках. Известно, что отношение общих каротиноидов к хлорофиллу-*a* может служить показателем физиологического состояния клеток фитопланктона. При старении популяции фитопланктона и неблагоприятных воздействиях факторов среды, величина отношения общих каротиноидов к хлорофиллу-*a* возрастает, что отражается на пигментном спектре. Для оценки в водных сообществах содержания каротиноидов по отношению к хлорофиллу-*a* могут быть использованы индексы E_{480}/E_{665} и E_{480}/E_{664} , повышение значений которых свидетельствует об ухудшении физиологического состояния фитопланктона и увеличении его пигментного разнообразия [2; 7; 8].

Кроме того, разные группы водорослей отличаются по составу пигментов и тоже могут идентифицироваться на основании анализа их спектра поглощения. Согласно литературным данным [2] и собственным исследованиям [9], индекс E_{450}/E_{480} характеризуется величинами выше 1 для дополнительных хлорофиллов и каротиноидов диатомовых и зеленых водорослей, а минимальные значения (около 1,0) характерны для желтых пигментов цианопрокариот.

Пигментный индекс E_{430}/E_{664} используется в качестве показателя пигментного разнообразия планктонных сообществ. Он отражает количественное соотношение между суммой общих каротиноидов и хлорофиллом-*a* в синей области спектра и хлорофиллом-*a* – в красной. Усиление в клетках процессов каротиногенеза или разрушение хлорофилла свидетельствует о замедлении уровня метаболизма и ухудшении физиологического состояния водорослей [7], поэтому при старении популяций фитопланктона и при неблагоприятных условиях среды, способствующих деструкции хлорофилла-*a*, величина индекса возрастает [10]. Для более корректной оценки содержания каротиноидов в водных сообществах был предложен скорректированный индекс $E_{480}/1,7E_{665k}$, учитывающий долю феопигментов в суммарном светопоглощении [6]. Индекс E_{430}/E_{412} (E_{430}/E_{410} (по некоторым литературным данным [11]) также 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 отношению хлорофиллов и феофитинов.

К существующим в литературе пигментным индексам мы предлагаем добавить новые – с целью контроля чистоты экстракта пигментов и правильности прописывания спектра их поглощения. Такие дополнительные числовые параметры контроля спектра необходимы для того, чтобы быть уверенными в правильности и точности применения пигментных индексов, описанных выше, и возможности использования их в качестве показателей состояния фитопланктона и водной экосистемы в целом. Для выбраковки плохо прописанных спектров нами были предложены следующие индексы [12]: E_{412}/E_{664} , E_{664}/E_{530} , E_{430}/E_{530} , E_{530}/E_{720} , E_{664}/E_{720} , E_{430}/E_{720} , E_{412}/E_{720} , отражающие соотношение поглощения на пиках и спадах пигментного спектра.

При статистической обработке данных использовали программу Microsoft Excel.

Результаты исследования и их обсуждение

Развитие автотрофной компоненты на исследованном отрезке реки, как было указано в методике, рассматривается по результатам наблюдений в летний сезон. В июле-августе в фитопланктоне р. Свислочь отмечены достаточно высокие величины общей численности и биомассы водорослей почти на всех исследованных станциях. Если рассматривать отдельно только русловые участки (станции 1, 5, 7, 9), то

отмечается закономерное нарастание плотности фитопланктонного сообщества вниз по течению. Общая численность организмов в летний период на этих станциях изменялась в очень широких пределах: от 1,7 до 78,8 – в июле, от 1,7 до 48,9 млн орг./л – в августе. Общая биомасса фитопланктона на верхних станциях была в несколько раз меньше, чем на нижних (0,3 против 16,5 в июле и 0,3 против 18,8 мг/л в августе).

Во всех обследованных водохранилищах также наблюдались высокие величины численности и биомассы фитопланктона. Более низкие значения численности организмов и общей биомассы отмечены в июле в водохранилищах Дрозды (Веснянка) и Комсомольское озеро, в августе – в Заславском водохранилище и Комсомольском озере. Максимальные величины показателей за весь период наблюдений отмечены в Чижовском водохранилище.

На рис. 2 представлена картина пространственного распределения общей численности и биомассы фитопланктона на исследованном отрезке р. Свислочь в июле–августе. В целом, в августе биомасса фитопланктона была выше, чем в июле. Максимум ее в июле наблюдался в микрорайоне Шабаны – 16,5 мг/л, в августе – в Чижовском водохранилище – 54,2 мг/л.

В табл. 1 приведен долевой вклад основных отделов водорослей в их общую численность и биомассу. Всего в фитопланктоне р. Свислочь обнаружены представители 8 отделов водорослей: синезеленые (цианобактерии), диатомовые, зеленые, золотистые, криптофитовые, эвгленовые, желто-зеленые и динофитовые.

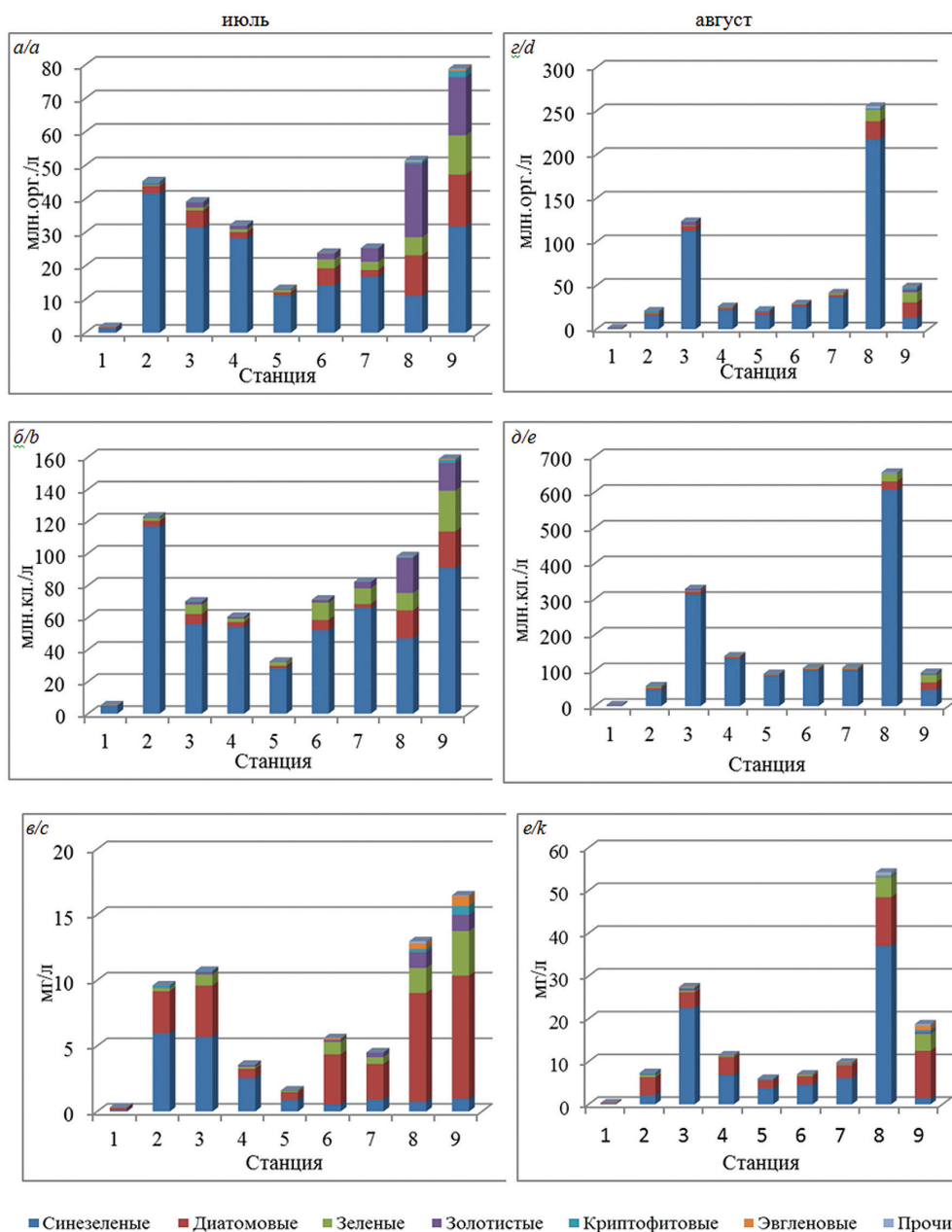


Рис. 2. Общая численность организмов (клеток) и биомасса водорослей в планктоне р. Свислочь в июле (а, б, в) и августе (г, д, е)

Fig. 2. Total number of organisms (cells) and algae biomass in plankton of the Svisloch R. in July (a, b, c) and August (d, e, k)

Таблица 1

Долевой вклад (%)* основных отделов водорослей в их общую численность и биомассу

Table 1

Share contribution (%)* of the main algae divisions in their total abundance and biomass

Номер станции **	Долевой вклад (%) по отделам				
	синезеленые	диатомовые	зеленые	золотистые	прочие
Июль					
1	<u>74,2 (89,7)</u> 26,8	<u>18,6 (5,9)</u> 61,1	<u>4,5 (3,5)</u> 4,6	<u>1,8 (0,6)</u> 3,3	<u>0,9 (0,3)</u> 4,3
2	<u>91,9 (94,8)</u> 62,0	<u>4,9 (2,9)</u> 33,4	<u>0,7 (1,4)</u> 2,6	<u>0,9 (0,3)</u> 0,4	<u>1,5 (0,6)</u> 1,6
3	<u>80,3 (79,6)</u> 52,9	<u>12,9 (9,2)</u> 36,6	<u>2,2 (8,4)</u> 7,8	<u>3,9 (2,4)</u> 1,8	<u>0,7 (0,4)</u> 0,8
4	<u>87,5 (89,5)</u> 71,9	<u>5,7 (4,9)</u> 19,6	<u>2,6 (3,4)</u> 4,3	<u>3,4 (1,8)</u> 3,5	<u>0,8 (0,4)</u> 0,7
5	<u>85,6 (87,2)</u> 53,9	<u>7,1 (4,7)</u> 37,9	<u>5,2 (7,3)</u> 5,6	<u>1,7 (0,7)</u> 2,2	<u>0,5 (0,2)</u> 0,5
6	<u>59,3 (73,1)</u> 9,7	<u>21,3 (9,0)</u> 67,9	<u>11,3 (15,2)</u> 16,9	<u>7,3 (2,5)</u> 3,0	<u>0,8 (0,3)</u> 2,4
7	<u>65,9 (80,3)</u> 20,1	<u>7,9 (2,9)</u> 60,3	<u>9,9 (11,8)</u> 11,4	<u>15,8 (4,8)</u> 7,6	<u>0,5 (0,2)</u> 0,7
8	<u>21,4 (47,9)</u> 5,9	<u>23,4 (17,7)</u> 63,7	<u>10,4 (11,0)</u> 14,6	<u>42,7 (22,4)</u> 9,3	<u>2,0 (1,1)</u> 6,5
9	<u>40,3 (57,3)</u> 5,9	<u>19,7 (14,3)</u> 56,9	<u>14,8 (15,9)</u> 20,6	<u>22,0 (10,9)</u> 7,5	<u>3,12 (1,6)</u> 9,1
Август					
1	<u>31,5 (64,6)</u> 2,4	<u>19,2 (11,0)</u> 81,5	<u>3,9 (1,9)</u> 1,3	<u>43,8 (21,7)</u> 6,1	<u>1,54 (0,8)</u> 8,6
2	<u>74,1 (79,9)</u> 27,9	<u>10,0 (9,7)</u> 57,3	<u>4,4 (6,0)</u> 7,4	<u>3,9 (1,4)</u> 2,9	<u>7,7 (2,9)</u> 4,5
3	<u>91,0 (95,4)</u> 82,0	<u>4,5 (2,2)</u> 13,4	<u>0,5 (0,7)</u> 1,2	<u>3,4 (1,5)</u> 1,9	<u>0,6 (0,2)</u> 1,5
4	<u>84,8 (94,3)</u> 59,3	<u>7,9 (3,7)</u> 36,9	<u>3,8 (1,4)</u> 2,5	<u>2,4 (0,5)</u> 0,9	<u>1,1 (0,2)</u> 0,5
5	<u>74,9 (92,6)</u> 62,1	<u>11,9 (3,1)</u> 31,9	<u>1,2 (1,4)</u> 0,8	<u>4,9 (1,2)</u> 1,8	<u>7,1 (1,7)</u> 3,4
6	<u>88,7 (93,8)</u> 63,7	<u>6,9 (3,2)</u> 29,6	<u>2,4 (2,5)</u> 4,4	<u>1,6 (0,4)</u> 1,5	<u>0,4 (0,1)</u> 0,8
7	<u>88,4 (92,4)</u> 62,9	<u>5,2 (3,4)</u> 30,6	<u>3,8 (3,2)</u> 2,2	<u>1,5 (0,6)</u> 2,1	<u>1,2 (0,5)</u> 2,1
8	<u>85,3 (92,5)</u> 68,3	<u>7,9 (3,7)</u> 20,9	<u>5,2 (3,2)</u> 8,5	<u>0,2 (0,1)</u> 0,1	<u>1,5 (0,6)</u> 2,1
9	<u>27,4 (48,4)</u> 7,6	<u>35,4 (22,0)</u> 58,9	<u>23,6 (22,5)</u> 21,1	<u>7,3 (3,8)</u> 2,2	<u>6,4 (3,3)</u> 10,2

Примечание. * В ячейках таблицы в числителе приведена доля представителей отдела в общей численности организмов (клеток); в знаменателе – доля представителей отдела в общей биомассе; ** расположение станций (рис. 1)

В июле – августе на большинстве исследованных станциях по общей численности клеток и организмов доминирующее положение занимали синезеленые водоросли; в отдельных случаях существенный вклад вносили представители диатомовых, зеленых и золотистых. По биомассе первенство разделили отделы синезеленые и диатомовые. Так, в июле на станциях 1, 6–9 биомасса фитопланктона состояла более чем на 50 % из диатомовых, на остальных главенствующую роль в биомассе играли синезеленые водоросли. В августе максимум биомассы был обусловлен представителями синезеленых на станциях 3–8, а на двух верхних и нижней станции – диатомовых.

Необходимым условием при использовании проб для расчета пигментных индексов является приготовление экстрактов из собранной на фильтр взвеси. Экстракты должны иметь достаточную оптическую плотность и быть хорошо очищенными от присутствия рассеивающих частиц. Соблюдая все указанные выше условия получения экстрактов, было проведено их последующее сканирование с помощью спектрофотометра. Типичный вид наблюдаемых спектров поглощения показан на рис. 3, однако для расчета пигментных индексов, оценивающих состояние фитопланктона, пригодны те, где прописываются четкие максимумы в красной и синей областях.

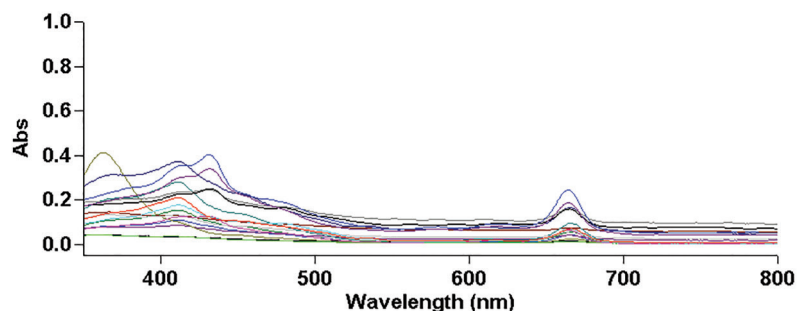


Рис. 3. Спектры поглощения пигментов планктона, измеренные в диапазоне длин волн 350–800 нм (*указаны спектры, непригодные для анализа пигментного состава проб)

Fig. 3. Absorption spectra of plankton pigments measured in the 350–800 nm wavelength range (*indicated spectra are unsuitable for pigment composition analysis in samples)

Однако прописанного спектра не всегда достаточно, особенно в природных водоемах. На рис. 3 заметно, что некоторые спектры (отмечены *) не отражают типичный для хлорофиллов и каротиноидов вид кривой с максимумами поглощения в синей и красной областях. Чтобы быть полностью уверенными в правильности выводов о структуре фитопланктона по пигментным индексам, предложено предварительно прописывать и анализировать спектры поглощения путем расчета вспомогательных индексов контроля экстрактов, которые представлены в табл. 2. Таким образом, нами были рассчитаны индексы E_{664}/E_{720} , E_{430}/E_{720} , которые показывают во сколько раз длинно- и коротковолновой пики спектра поглощения хлорофилла-а больше фонового значения чистоты экстракта (на 720 нм), при этом длина волны 664 нм соответствует максимальному поглощению хлорофилла-а в длинноволновой области спектра, 430 нм – пик хлорофилла-а в коротковолновой области спектра. При высоком содержании фео-пигментов можно использовать похожий индекс E_{412}/E_{720} , где 412 нм – максимальное значение светопоглощения для феофитина-а). Индекс E_{530}/E_{720} также используется для подтверждения правильности прописывания спектра. На длине волны 530 нм наблюдается спад спектра растительных пигментов ввиду того, что здесь располагается переходная зона (зеленая и голубая), где практически не идет светопоглощение, однако значения здесь не должны быть ниже фонового значения 720 нм и, соответственно, данный индекс не может быть ниже 1 (см. рис. 3). Индексы E_{430}/E_{530} и E_{664}/E_{530} показывают отношение пика хлорофиллов-а к спаду в спектре поглощения. Значения этих индексов должны быть выше 1 и меньше величин индексов E_{664}/E_{720} и E_{430}/E_{720} . Может также применяться индекс E_{412}/E_{664} , который показывает, во сколько раз пик феофитина-а в синей области спектра больше пика хлорофилла-а в красной области.

Таблица 2

Пигментные индексы контроля чистоты экстракта в водохранилищах и речных участках р. Свислочь

Table 2

The pigment indexes of control of the purity of the extract in the river sections and reservoirs of Svisloch R.

Номер станции	E_{664}/E_{720}	E_{430}/E_{720}	E_{530}/E_{720}	E_{430}/E_{530}	E_{664}/E_{530}
Июнь					
1	26,00	54,00	1,00	54,00	26,00
2	57,00	116,00	5,00	23,20	11,40
3	18,67	38,50	3,50	11,00	5,33
4	24,00	56,00	3,00	18,67	8,00

Продолжение табл. 2

Table 2

5	21,00	49,00	2,00	24,50	10,50
6	14,00	45,00	4,00	11,25	3,50
7	30,50	61,00	4,50	13,56	6,78
8	53,50	109,50	7,50	14,60	7,13
9	32,00	67,00	4,00	16,75	8,00
Июль					
1	1,88	3,75	1,50	2,50	1,25
2	8,40	16,80	2,60	6,46	3,23
3**	2,11	3,68	1,42	2,59	1,48
4*	1,28	1,98	1,28	1,55	1,00
5	18,67	35,67	4,67	7,64	4,00
6	8,33	18,33	3,00	6,11	2,78
7	3,06	5,30	1,50	3,53	2,04
8	23,25	45,00	5,75	7,83	4,04
9	2,15	3,59	1,48	2,43	1,45
Август					
1	3,00	6,75	1,75	3,86	1,71
2	22,00	42,33	4,00	10,58	5,50
3	13,80	25,40	5,40	4,70	2,56
4**	1,65	2,54	1,24	2,05	1,33
6**	2,12	3,32	1,31	2,54	1,62
7	4,80	7,86	1,61	4,89	2,99
8	4,16	7,49	1,49	5,03	2,79
9	8,63	15,88	3,38	4,70	2,56
<i>Примечание.</i> Пробы * непригодные для расчета пигментных индексов, ** сомнительные					

Наиболее четко прописанные спектры для исследованных участков р. Свислочь получены в июньских пробах, именно такие образцы наиболее пригодны для расчета и анализа пигментных индексов, отражающих структуру фитопланктона. Итак, самые высокие величины характерны для индекса E_{430}/E_{720} , что подтверждает правильность прописывания спектра поглощения, характерного для хлорофиллов, поскольку больший пик отмечается в коротковолновой области спектра. Согласно полученным данным, показатели индекса E_{664}/E_{720} в среднем оказались в 2 раза меньше описанного выше индекса E_{430}/E_{720} , подтверждая, что пик в длинноволновой области спектра меньше, чем в коротковолновой. Данные по индексу E_{530}/E_{720} колебались от 1 до 7,5 (в среднем составив 3,0). Полученные величины по индексам E_{430}/E_{530} и E_{664}/E_{530} во всех образцах были больше 1 и меньше значений индексов E_{430}/E_{720} и E_{664}/E_{720} соответственно.

Проанализировав индексы контроля чистоты экстракта и спектры поглощения, июльская проба со станции 4 была признана непригодной для расчета пигментных индексов (разница в светопоглощении на пиках хлорофилла и фоновым участком была <2), и некоторые пробы (июль – 3 станция, август – 4, 6 станции) мы сочли сомнительными, так как спектр был пописан не вполне четко.

После анализа индексов контроля чистоты экстракта и четкости прописывания спектра, были рассчитаны пигментные индексы, характеризующие состояние первичных продуцентов (табл. 3).

Таблица 3

Пигментные индексы в водохранилищах и речных участках р. Свислочь

Table 3

The pigment indexes in the river sections and reservoirs of Svisloch R.

Номер станции	E_{450}/E_{480}	E_{430}/E_{664}	E_{480}/E_{664}	E_{430}/E_{412}
Июнь				
1	1,88	2,08	0,65	1,02
2	1,94	2,04	0,61	1,17
3	1,41	2,06	0,96	1,20
4	1,71	2,33	0,88	0,98
5	1,88	2,33	0,81	1,04
6	1,87	3,21	1,07	0,83
7	1,85	2,00	0,66	1,02

Продолжение табл. 3

Table 3

8	1,79	2,05	0,70	1,05
9	1,62	2,09	0,81	1,12
Июль				
1	1,35	2,00	1,13	0,88
2	1,41	2,00	1,05	0,77
3	1,23	1,75	1,18	0,81
4	1,10	1,55	1,26	0,88
5	1,58	1,91	0,93	0,70
6	1,56	2,20	1,08	0,56
7	1,46	1,73	0,95	0,77
8	1,72	1,94	0,87	0,64
9	1,25	1,67	1,16	0,73
Август				
1	1,40	2,25	1,25	0,75
2	1,48	1,92	0,76	1,02
3	1,10	1,84	1,36	0,72
4	1,14	1,54	1,06	1,04
6	1,10	1,57	1,03	1,10
7	1,26	1,64	0,77	1,13
8	1,45	1,80	0,84	1,12
9	1,33	1,84	1,16	0,61

По результатам наблюдений на станциях р. Свислочь индекс E_{430}/E_{664} колебался в небольших пределах: июнь 2,0–2,3; июль 1,5–2,0; август 1,5–2,2. Значения индекса E_{480}/E_{664} на всех исследованных станциях были в 2–3 раза ниже, чем значения индекса E_{430}/E_{664} : июнь 0,61–1,07; июль 0,87–1,26; август 0,76–1,36. Таким образом, полученные данные свидетельствуют о нормальном физиологическом состоянии и стабильном количестве в фитопланктоне жизнеспособных активных клеток. Некоторое повышение индекса в июле-августе указывает на ухудшение условий обитания (возможно при возрастании количества фитопланктона в сравнении с началом лета).

Показатели двух индексов – E_{480}/E_{665} и E_{480}/E_{664} – почти аналогичны, так как пик хлорофилла-а соответствует в длинноволновой области спектра длине волны 664 нм, поэтому для дальнейшего анализа мы использовали индекс E_{480}/E_{664} . Значения индекса E_{430}/E_{412} соответствуют преобладающему содержанию фотосинтетически активного хлорофилла-а с невысоким присутствием каротиноидных пигментов – величина индекса в среднем составила 0,91, что хорошо сопоставимо с данными по удельному содержанию феопигментов в пробах – около 15 %.

По результатам 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 $r = -0,81$ (рис. 4).

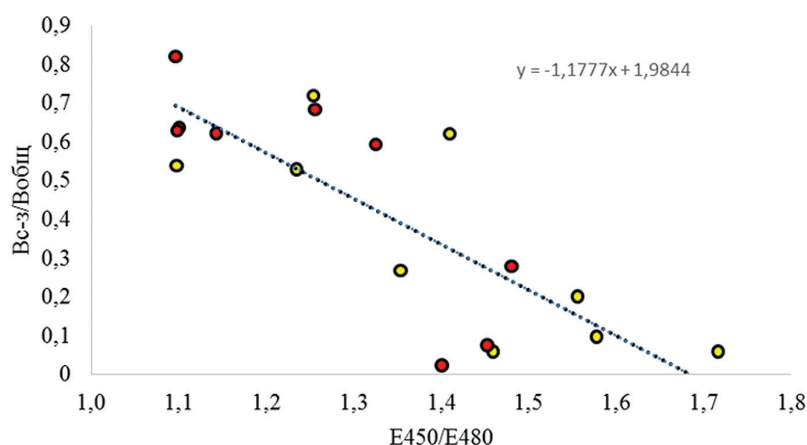


Рис. 4. Связь пигментного индекса E_{450}/E_{480} с долей синезеленых водорослей в общей биомассе фитопланктона (Вс-з/Вобщ) в водохранилищах и речных участках р. Свислочь (желтым отмечены данные за июль, красным – за август)

Fig. 4. Relationship of the pigment index E_{450}/E_{480} with the share of blue-green algae in the total biomass of phytoplankton in the river sections and reservoirs of the Svisloch R. (yellow dots are data for July, red – for August)

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 [8].

На основании анализа зависимости значений пигментного индекса E_{450}/E_{480} от содержания цианопрокариот в общей биомассе водорослей была составлена шкала (табл. 4) для примерной оценки доли синезеленых водорослей по величине индекса E_{450}/E_{480} .

Таблица 4

Примерная оценка доли цианопрокариот в общей биомассе фитопланктона в р. Свислочь по значениям пигментного индекса E_{450}/E_{480}

Table 4

An approximate estimate of the share of cyanobacteria in total phytoplankton biomass in Svisloch R. based on the values of the pigment index E_{450}/E_{480}

Значение индекса E_{450}/E_{480}	Примерная доля цианопрокариот, % в общей биомассе
<1,0	100–70
1,1–1,19	70–60
1,2–1,29	60–50
1,3–1,39	40–50
1,4–1,49	30–40
1,5–1,59	20–30
1,6–1,69	10–20
1,7–1,79	до 10
>1,8	около 0

По данным табл. 3 и 4 можно судить о том, насколько массовым было развитие синезеленых водорослей в пробах, собранных в р. Свислочь в июне. Высокие значения индекса E_{450}/E_{480} (1,6–1,9) в большинстве собранных образцов воды свидетельствуют о слабом долевым участии цианобактерий в формировании общей биомассы водорослей планктона (<20 %). Только на станции 3 (водохранилище Дрозды) рассчитанная доля цианобактерий составила порядка 30 % в общей биомассе фитопланктона. Результаты работы подтверждают, что при грамотном подходе пигментные индексы могут быть использованы в качестве одного из параметров оценки качества воды и состояния фитопланктона для всех типов водоемов.

Заключение

Проведена работа по расчету пигментных индексов и оценке их связи со структурными характеристиками фитопланктона. Анализ пигментных индексов, отражающих физиологическое состояние фитопланктона показал, что информативными для работы на речных участках и водохранилищах р. Свислочь были следующие: E_{450}/E_{480} , E_{480}/E_{664} , E_{430}/E_{664} , E_{430}/E_{412} . Предложены также дополнительные индексы контроля чистоты экстракта, которые могут быть использованы в качестве критериев качества исследуемой пробы. Рассчитан коэффициент корреляции между индексом E_{450}/E_{480} и долей синезеленых водорослей в общей биомассе ($r = -0,81$). На основании данного индекса можно судить о том, являются ли цианопрокариоты доминирующей группой фитопланктона в исследованном участке водоема. Это подтверждено счетными данными по биомассе водорослей.

Таким образом, пигментные индексы могут быть использованы в качестве одного из интегральных параметров оценки качества воды, позволяющих оперативно отслеживать изменения в экосистемах по структуре фитопланктона.

Библиографические ссылки

1. Lorenzen C. J. Determination of chlorophyll and phaeopigments: spectrophotometric equations // *Limnology Oceanography*. 1967. Vol. 12. P. 343–346. DOI: 10.4319/lo.1967.12.2.0343.
2. Сиделев С. И., Бабаназарова О. В. Анализ связей пигментных и структурных характеристик фитопланктона высокоэвтрофного озера // *J. of Siberian Federal University. Biology*. 2008. Vol. 2, № 1. P.162–177.
3. Михеева Т. М. Методы количественного учета нанофитопланктона (обзор) // *Гидробиологический журнал* 1989. Т. 25, № 4. С. 3–21.
4. Киселев И. А. Планктон морей и континентальных водоемов. 1. Вводные и общие вопросы планктологии. М.–Л., 1969.
5. Михеева Т. М. Альгофлора Беларуси. Таксономический каталог. Минск, 1999.
6. Hillebrand H., Durselen C.-D., Kirschtel D., et al. Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae // *J. Phycol.* 1999. Vol. 35. P. 403–424.
7. Сигарева Л. Е. Хлорофилл в донных отложениях волжских водоемов. М., 2012.
8. Leavitt P. R. Hodgson D. A. Sedimentary Pigments. In: Smol JP, Birks HJ, Last WM (eds) *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments*. Vol. 3: *Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators*. Dordrecht, 2006. P. 295–325. DOI: 10.1007/0-306-47668-1_15.
9. Смольская О. С., Жукова А. А., Люля А. С. Пигментные и физико-химические характеристики донных отложений озер Нарочь и Мястро // *Журнал Белорусского государственного университета. Биология*. 2018. № 2. С. 65–77.
10. Determination of photosynthetic pigments in sea-water: monographs on *Oceanologic Methodology*. Paris, 1966. P. 9–18.
11. Moss B. A spectrophotometric method for the estimation of percentage degradation of chlorophylls to phaeo-pigments in extracts of algae // *Limnology and Oceanography*. 1967. Vol. 12. P. 335–340. DOI: 10.4319/lo.1967.12.2.0335.
12. Смольская О. С., Жукова А. А. Спектральные пигментные индексы фитопланктона в разнотипных водных объектах Беларуси // *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2018. № 1. С. 113–123.

References

1. Lorenzen C. J. Determination of chlorophyll and phaeopigments: spectrophotometric equations. *Limnology Oceanography*. 1967. Vol. 12. P. 343–346. DOI: 10.4319/lo.1967.12.2.0343.
2. Sidelev S. I., Babanazarova O. V. [Analysis of pigment and structural characteristics of phytoplankton in a highly eutrophic lake]. *J. of Siberian Federal University. Biology*. 2008. Vol. 2, № 1. P.162–177 (in Russ.).
3. Mikheeva T. M. [Methods of quantitative accounting of nanophytoplankton (review)]. *Gidrobiologicheskij zhurnal*. 1989. Vol. 25, No. 4. P. 3–21 (in Russ.).
4. Kiselev I. A. [Plankton of seas and continental reservoirs. 1. Introductory and general issues of planctology]. Moscow; Leningrad, 1969 (in Russ.).
5. Mikheeva T. M. [Algal flora of Belarus. Taxonomic catalogue]. Minsk, 1999 (in Russ.).
6. Hillebrand H., Durselen C.-D., Kirschtel D., et al. Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. *J. Phycol.* 1999. Vol. 35. P. 403–424.
7. Sigareva L. Ye. [Chlorophyll in bottom sediments of Volga reservoirs]. Moscow, 2012 (in Russ.).
8. Leavitt P. R. Hodgson D. A. Sedimentary Pigments. In: Smol JP, Birks HJ, Last WM (eds) *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments*. Vol. 3: *Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators*. Dordrecht, 2006. P. 295–325. DOI: 10.1007/0-306-47668-1_15.
9. Smolskaya, V. S., Zhukova, A. A., Lyulya, A. S. [Pigment and physico-chemical characteristics of bottom sediments of the lakes Naroch and Myastro]. *J. of the Belarusian State University. Biology*. 2018. No. 2. P. 65–77 (in Russ.).
10. Determination of photosynthetic pigments in sea-water. *Monographs on Oceanologic Methodology*. Paris, 1966. P. 9–18.
11. Moss B. A spectrophotometric method for the estimation of percentage degradation of chlorophylls to phaeo-pigments in extracts of algae. *Limnology and Oceanography*. 1967. Vol. 12. P. 335–340. DOI: 10.4319/lo.1967.12.2.0335.
12. Smolskaya V. S., Zhukova A. A. [Spectral pigment indices of phytoplankton in various water bodies of Belarus]. *J. of the Belarusian State University. Ekologiya*. 2018. № 1. P. 113–123 (in Russ.).

Статья поступила в редколлегию 30.11.2018
Received by editorial board 30.11.2018