

ИЗУЧЕНИЕ И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

THE STUDY AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

УДК 574.5;577.33/34;577.355

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА И КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПО СПЕКТРАЛЬНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ВОДЫ НА ОТРЕЗКЕ Р. СВИСЛОЧЬ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

Т. М. МИХЕЕВА¹⁾, Р. З. КОВАЛЕВСКАЯ¹⁾, Н. В. ДУБКО¹⁾, Ю. К. ВЕРЕС¹⁾, В. Я. ВЕНЧИКОВ²⁾

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

²⁾Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы Белорусского государственного университета, ул. Курчатова, 7, 220064, г. Минск, Беларусь

Образец цитирования:

Михеева ТМ, Ковалевская РЗ, Дубко НВ, Верес ЮК, Венчиков ВЯ. Определение компонентного состава и качественных характеристик органического вещества по спектральным характеристикам воды на отрезке р. Свислочь в летний период. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2019;2:21–33.

For citation:

Mikheeva TM, Kovalevskaya RZ, Dubko NV, Veres JuK, Venchikov VYa. Determination of component composition and qualitative characteristics of organic substance by spectral characteristics of water of the river Svisloch section in the summer period. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2019;2:21–33. Russian.

Авторы:

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

Раиса Зеноновна Ковалевская – старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории гидроэкологии.

Наталья Владимировна Дубко – научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории гидроэкологии.

Юлия Константиновна Верес – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории гидроэкологии.

Виталий Яковлевич Венчиков – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией оптических средств измерения.

Authors:

Tamara M. Mikheeva, doctor of science (biology), docent; chief researcher at the research laboratory of aquatic ecology.
mikheeva@tut.by

Raisa Z. Kovalevskaya, senior researcher at the research laboratory of aquatic ecology.
lakes@bsu.by

Natalya V. Dubko, researcher at the research laboratory of aquatic ecology.
lakes@bsu.by

Julia K. Veres, PhD (biology), senior researcher at the research laboratory of aquatic ecology.
Veres.julia.naroch@gmail.com

Vitaly Ya. Venchikov, PhD (physics and mathematics), head of optical measurement laboratory.
venchikov@yahoo.com

На отрезке р. Свислочь – главной водной артерии г. Минска с каскадом водохранилищ в летние месяцы 2016 г. изучали пространственное распределение общего пула органических веществ (ОВ) и его компонентный состав (растворенная и взвешенная фракции, содержание хлорофилла *a* – косвенный показатель биомассы фитопланктона). Использовали общепринятые в гидробиологии методы с одновременным определением спектральных характеристик воды, что явилось их первым применением для речной системы в Беларуси. Наблюдения проведены в прибрежной зоне на 9 створах водотока (от верховья до выхода из города). Дана картина временных и пространственных изменений всех изучаемых параметров вниз по течению русловых и водохранилищных участков. Особое внимание уделялось выявлению взаимосвязи компонентов органического вещества с содержанием хлорофилла *a* и спектральных характеристик воды. Выявлено тесное взаимодействие всех компонентов ОВ с содержанием хлорофилла *a*, что свидетельствует о приоритетной роли сообщества фитопланктона в формировании ОВ, а также их связь с оптическими характеристиками воды, которые можно использовать для оперативного экологического мониторинга.

Ключевые слова: Беларусь; р. Свислочь; русловые участки; водохранилище; оптические характеристики воды; фракции органического вещества; сестон, хлорофилл *a*.

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.

DETERMINATION OF COMPONENT COMPOSITION AND QUALITATIVE CHARACTERISTICS OF ORGANIC SUBSTANCE BY SPECTRAL CHARACTERISTICS OF WATER OF THE RIVER SVISLOCH SECTION IN THE SUMMER PERIOD

T. M. MIKHEEVA^a, R. Z. KOVALEVSKAYA^a, N. V. DUBKO^a, Ju. K. VERES^a, V. Ya. VENCHIKOV^b

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

^bNational Research Center for Monitoring the Ozonosphere of Belarusian State University,
7 Kurčatava Street, Minsk 220064, Belarus

Corresponding author: T. M. Mikheyeva@tut.by

On the section of the Svisloch River – the main waterway of the Minsk city with a cascade of reservoirs in the summer months of 2016 there were studied the spatial distribution of the total pool of organic matter (OM) and its composition (dissolved and suspended fractions, chlorophyll *a* content – indirect indicator of phytoplankton biomass). Generally accepted in hydrobiology methods were used with simultaneous determination of the spectral characteristics of water, what was their first use for the river system in Belarus. The observations were carried out in the coastal zone at 9 sections of the watercourse from the headwaters to the exit from the city. The picture of temporal and spatial changes of all studied parameters downstream of the channel and reservoir areas is given. Particular attention was paid to identifying the relationship of the components of organic matter with the content of chlorophyll *a* and the spectral characteristics of water. A close relationship of all OM components was revealed with the chlorophyll *a* content, which indicates the priority role of the phytoplankton community in the formation of organic matter as well as their relationship with the optical characteristics of water that can be used for operational environmental monitoring.

Key words: Belarus; Svisloch; channel areas; reservoirs; optical water characteristics; organic matter fractions; seston; chlorophyll *a*.

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

Органическое вещество (ОВ) является одним из определяющих факторов в функционировании и формировании качества поверхностных вод. Весь запас ОВ распределен в двух основных фракциях – растворенной и взвешенной. Определение содержания ОВ (особенно в растворенной фракции) и его качественных параметров в водных экосистемах является трудоемкой процедурой, требующей значительных затрат времени и ресурсов. Использование приборной базы, основанной на принципе измерений оптических параметров воды, позволяет значительно упростить задачу и выработать методику быстро-

го и малозатратного определения количественных и качественных показателей ОВ поверхностных вод, что является актуальным в контексте наблюдающейся в настоящее время оптимизации расходов на мониторинг поверхностных вод. Органическое вещество в водных экосистемах формируется в результате сложного комплекса внутриводоемных гидрологических, физико-химических, биологических процессов (автохтонное ОВ), а также при поступлении с водосборной территории и атмосферными осадками (аллохтонное ОВ). Биологические процессы при этом играют решающую роль, обеспечивая эффективность самоочищения, качество воды и формирование продуктивности водоемов и речных экосистем, их трофический статус. Оптические свойства водной среды обусловлены присутствием оптически активных компонентов взвешенного и растворенного вещества, в формировании которых приоритетную роль играют микроводоросли толщи воды – фитопланктон. Трудоемкость количественного определения биомассы фитопланктона делает оправданным использование непрямых методов ее оценки, в частности, по содержанию хлорофилла *a* в единице объема. В последнее время этот метод становится все более популярным в экологическом мониторинге водных экосистем. Изучение спектральных характеристик воды, их связи с оптически активными компонентами взвешенного и растворенного органического взвешенного вещества необходимо для создания эмпирической модели, позволяющей инструментальными методами оперативно оценивать экологическую ситуацию в водной экосистеме. С этой целью на отрезке р. Свислочь летом 2016 г. с применением общепринятых в гидробиологии методов и регистрации спектров абсорбции выполнены исследования по изучению связи количественных и качественных параметров взвешенного и растворенного ОВ, в том числе содержания хлорофилла, с оптическими характеристиками воды.

Материалы и методы исследования

Река Свислочь, самый крупный приток р. Березины – главная водная артерия г. Минска с каскадом водохранилищ, подвержена высокой антропогенной нагрузке. Летом на всем протяжении городского отрезка реки периодически возникает «цветение» воды цианобактериями (синезелеными водорослями), что сопровождается ухудшением экологической ситуации. Наблюдения велись в летние месяцы 2016 г. на отрезке от верховья водотока, являющегося частью канала Вилейско-Минской водной системы, до выхода из г. Минска в микрорайоне Шабаны. Пробы отбирались в прибрежной зоне 9 створов: канале переборки Вилейской воды (ств. 1), на водохранилищах Заславское (ств. 2), Дрозды (ств. 3 и 4), Комсомольское оз. (ств. 6), Чижовское (ств. 8) и русловых участках в районах футбольного манежа (ств. 5), ул. Аранская (ств. 7) и микрорайона Шабаны (ств. 9). Схема расположения створов представлена на рис. 1.

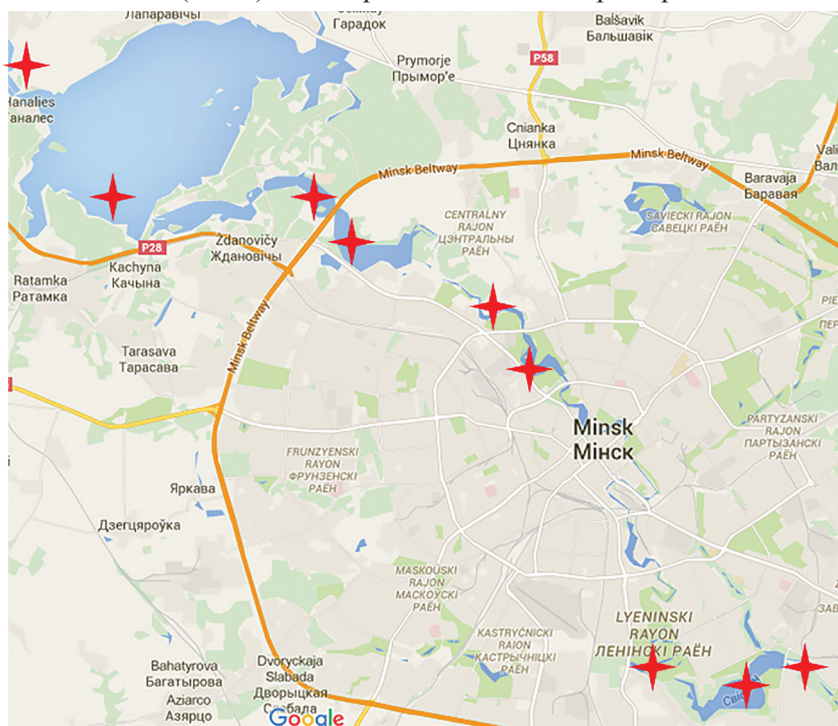


Рис. 1. Картограмма расположения станций забора проб на речных участках и водохранилищах р. Свислочь

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

В пробах определяли концентрацию взвешенных веществ (сестона) по сухой массе, содержание хлорофилла *a* в их составе, концентрации общего пула и растворенного органического вещества с одновременной оценкой оптических характеристик воды по спектрам абсорбции в коротковолновом диапазоне.

Содержание сестона оценивали гравиметрическим методом, используя тарированные мембранные фильтры с диаметром пор 1,0 мкм после высушивания их при температуре 60 °С. На этих же фильтрах спектрофотометрическим методом ацетоновых экстрактов [1] определяли содержание хлорофилла *a*. В работе величины хлорофилла *a* приведены без учета феопигментов.

Концентрацию общего пула ОВ (ХПК – химическое потребление кислорода) в воде определяли по величине бихроматной окисляемости сухого остатка после выпаривания проб воды на водяной бане в модификации А. П. Остапени [2]. Таким же образом устанавливали концентрацию растворенного органического вещества (РОВ) в фильтрате. Содержание взвешенного органического вещества (ВОВ) рассчитывали по разности между величинами ХПК и РОВ. Для оценки изменений в содержании и составе РОВ одновременно с указанными методами был использован не получивший пока широкого применения метод определения оптических характеристик воды по спектрам абсорбции нативной (нефильтрованной) и фильтрованной воды относительно дистиллята с регистрацией их на двухлучевом спектрофотометре SPECORD M40. В качестве оптических характеристик были использованы коэффициенты светопоглощения α_λ при определенной длине волны (λ), их соотношение и коэффициенты экспоненциального наклона *S*.

Коэффициент светопоглощения α_λ при определенной длине волны (λ) рассчитывали по формуле (1) согласно [3]:

$$\alpha_\lambda = 2.303 \cdot D(\lambda) / l, \quad (1)$$

где α_λ – коэффициент светопоглощения при длине волны λ , м^{-1} ;

$D(\lambda)$ – оптическая плотность воды при длине волны λ ;

l – длина кюветы, м.

В коротковолновом диапазоне величины оптической плотности и, соответственно, коэффициенты светопоглощения заметно возрастают с уменьшением длины волны. Зависимость α_λ от длины волны для отдельных участков спектра может быть описана экспоненциальным уравнением:

$$\alpha_\lambda = \alpha_{\lambda_1} \cdot e^{S \cdot (\lambda - \lambda_1)}, \quad (2)$$

где α_λ , α_{λ_1} – коэффициенты светопоглощения при соответствующих (λ и λ_1) длинах волн;

S – коэффициент экспоненциального наклона, нм^{-1} .

Коэффициент S отражает качественный состав РОВ и может использоваться для оценки соотношений фульво- и гуминовых кислот, молекулярного веса, соотношения органического вещества аллохтонного и автохтонного происхождения [4; 5].

Статистический анализ данных проводили в табличном редакторе Excel и с использованием программы Statistica 8.0. В корреляционном анализе использовался коэффициент корреляции Спирмена (Spearman rank). Уровень статистической значимости всех критериев принимался равным 0,05 [6].

Результаты исследования и их обсуждение

Концентрация взвешенных веществ (сестона) и содержание хлорофилла *a*. Характер пространственных изменений содержания взвешенных веществ и хлорофилла на наблюдаемом отрезке реки, как следует из рис. 2, в исследуемый период весьма сходен. Лишь в июне на русловом участке в районе улицы Аранская синхронность хода двух показателей была нарушена в результате значительного поступления аллохтонной взвеси с береговой территории. Относительное содержание хлорофилла в сухой массе сестона здесь оказалось крайне низким (0,02 %). Высокий коэффициент парной корреляции содержания сестона и хлорофилла (0,96) указывает на значительную роль фитопланктона в формировании взвешенных веществ, прежде всего, в системе водохранилищ. Размах пространственных изменений содержания хлорофилла, следовательно, количественного развития фитопланктона гораздо шире, чем общей массы взвеси. Содержание взвеси укладывалось в пределы 2,1–156,1 мг/л, содержание хлорофилла – 1,4–457,0 мкг/л. Наименьшие величины показателей во все сроки наблюдений отмечены в верховье реки – 2,12–2,8 мг/л и 1,4–5,6 мкг/л соответственно. Максимальные значения хлорофилла были приурочены, как правило, к нижним створам. Чрезвычайно высокое содержание взвеси (156 мг/л) и хлорофилла (457 мкг/л) в августе в прибрежной зоне Чижовского водохранилища, принимающего поверхностный сток с большей части территории города, обуславливалось интенсивным «цветением» воды и скоплением цианопрокариот в прибрежной зоне. Высокий уровень содержания хлорофилла и взвеси был характерен и для створа на выходе водотока из города в микрорайоне Шабаны. Абсолютное содержание

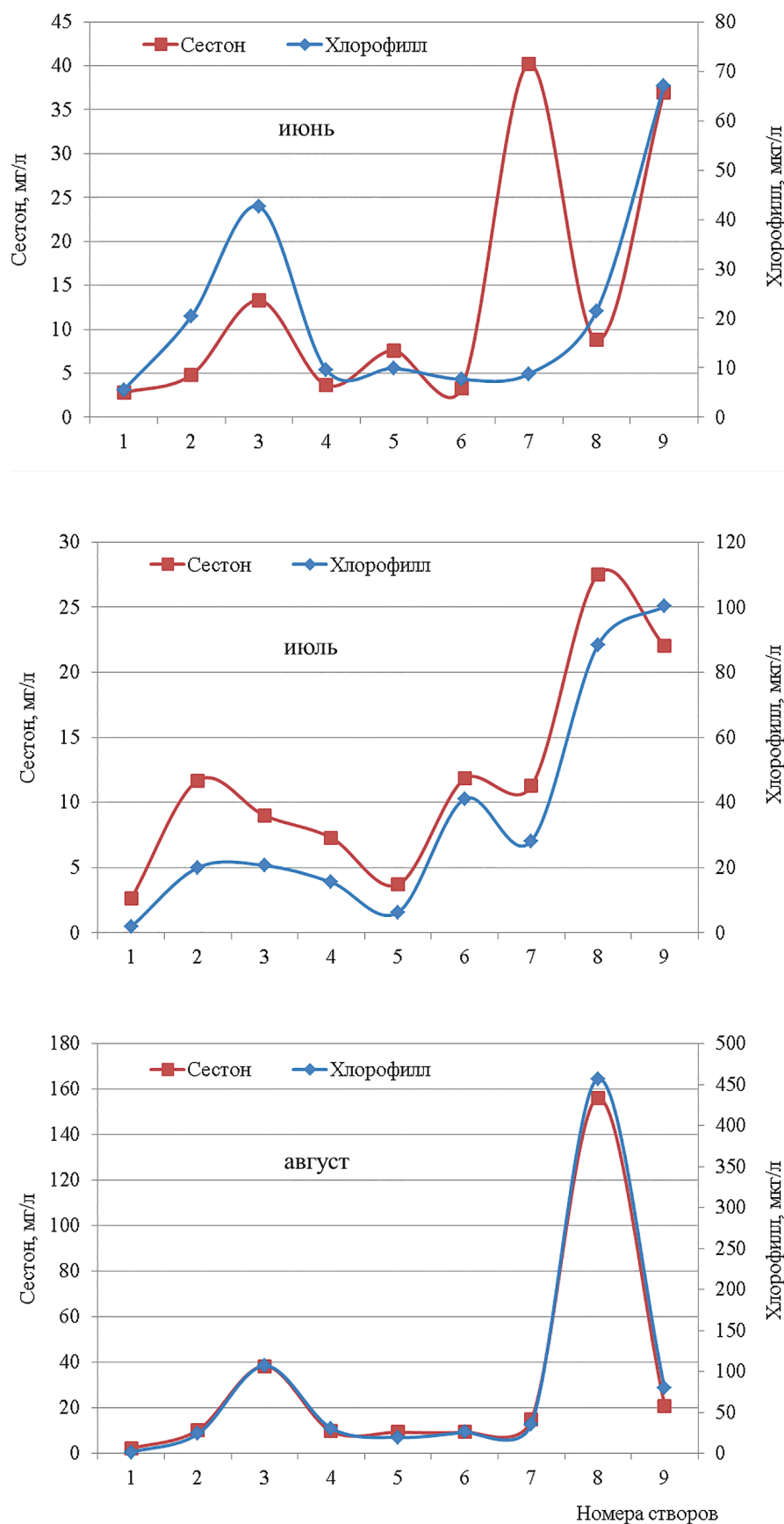


Рис. 2. Распределение величин сухой массы сестона и хлорофилла *a* в р. Свислочь в летний период

Fig. 2. The distribution of the dry weight of seston and chlorophyll *a* in the R. Svisloch in the summer

хлорофилла в реке на протяжении периода наблюдений различалось на порядки. Его относительное содержание в сухой массе сестона (0,02–0,44 %) различалось менее значительно, хорошо отражая наличие абиогенной доли в составе взвешенных веществ на различных участках реки. Повышенное содержание взвешенных веществ и хлорофилла в июне и августе наблюдалось в водохранилище Дрозды за МКАД, где непосредственно на берегу расположены стоянка машин и примитивная шашлычная. Таким образом, в периоды высокой рекреационной нагрузки на данном участке водохранилища может резко ухудшаться экологическая ситуация.

Анализ всего массива полученных данных показал тесную зависимость между общей концентрацией взвешенных веществ и содержанием хлорофилла, что отражено в материалах, приведенных на рис. 3.

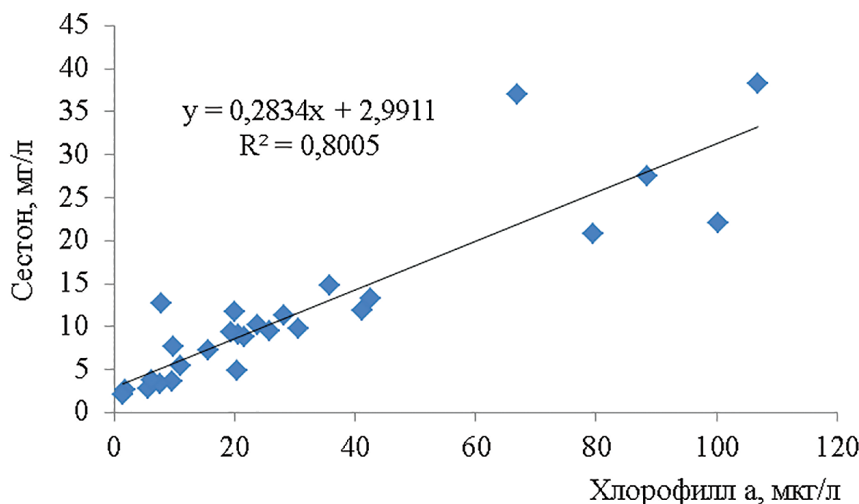


Рис. 3. Связь между содержанием хлорофилла *a* и концентрацией сестона в р. Свислочь в летний период (на графике отражено уравнение линейной зависимости и его коэффициент аппроксимации R^2)

Fig. 3. The relationship between chlorophyll *a* content and seston concentration in the Svisloch River in the summer (the linear regression equation and its approximation coefficient R^2 is presented on the graph)

Коэффициент корреляции Спирмена между показателями оказался высоким (0,89, $n=27$, $p<0,05$). Приведенные результаты свидетельствуют о важнейшей роли фитопланктона в процессах формирования взвешенных веществ, а следовательно, и качества воды на исследованном участке реки летом.

Общее содержание органического вещества (ХПК), растворенной (РОВ) и взвешенной (ВОВ) фракций в его составе. В общем пуле органических веществ выделяют две основные фракции – взвешенное (ВОВ) и растворенное (РОВ) органическое вещество. Граница между ними достаточно условна. К РОВ могут относить сумму органических веществ, определяемых в фильтрате после фильтрации воды через фильтры с разным диаметром пор – от 0,45 мкм до 1,5 мкм. Нами были использованы фильтры с размером пор 1,0 мкм. На рис. 4 представлены временные и пространственные изменения параметров органического вещества на отрезке реки в летний сезон.

Надо отметить большое сходство характера сезонной динамики и пространственного распределения концентрации всех составляющих органического вещества в воде на рассматриваемом отрезке реки с динамикой и распределением содержания взвешенных веществ и хлорофилла *a*, представленных в предыдущем разделе. Однако вариабельность показателей органического вещества была гораздо меньше. Так, за исключением Чижовского водохранилища, в августе, когда все показатели ОВ здесь оказались чрезвычайно высокими (ХПК – 138,74 мгО₂/л, РОВ – 44,94 мгО₂/л, ВОВ – 93,84 мгО₂/л), их изменения за сезон укладывались в пределы: 22,4–52,6 мг О₂/л; 18,9–44,9 мг О₂/л и 0,9–23 мг О₂/л соответственно. В общем пуле ОВ, за исключением Чижовского водохранилища, в августе преобладало содержание РОВ (60–97 %). При массовом развитии синезеленых водорослей в августе в Чижовском водохранилище содержание РОВ оказалось немногим более 30 %. Диапазон изменений соотношения РОВ/ВОВ колебался в широких пределах (от 0,5 до 30 раз), что определяется, прежде всего, динамичной продукционно-деструкционной активностью живой компоненты взвеси, в формировании которой приоритетная роль принадлежит планктонным водорослям. В табл. 1 приведены данные, характеризующие корреляционную связь ХПК, ВОВ и РОВ с содержанием хлорофилла *a*.

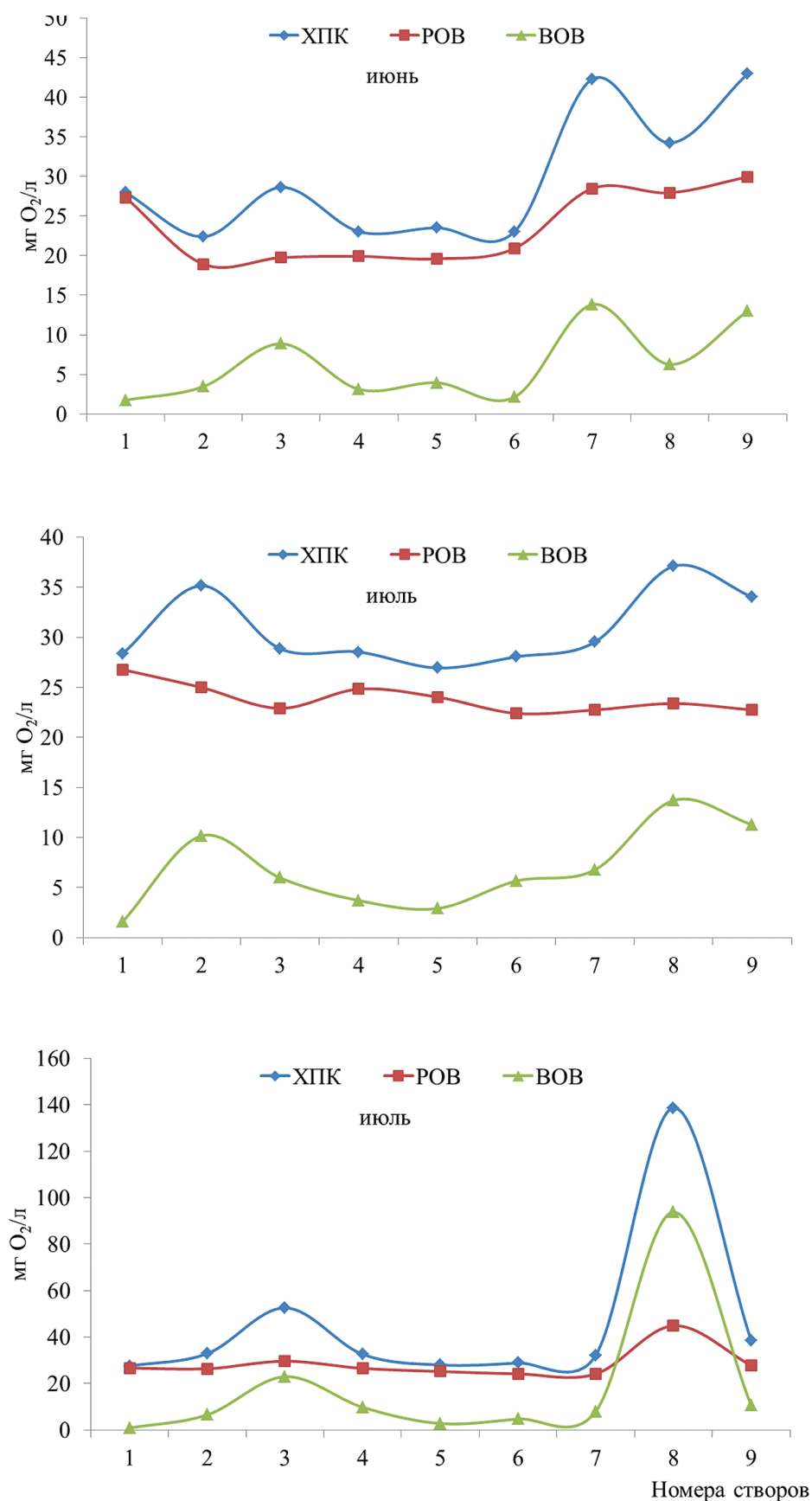


Рис. 4. Распределение общего органического вещества и его фракций на отрезке р. Свислочь в летние месяцы

Fig. 4. Distribution of total organic matter and its fractions on the Svisloch River sections in the summer months

Таблица 1

Корреляционная матрица коэффициентов Спирмена между параметрами органического вещества, содержанием сестона и хлорофилла в водохранилищах и русловых участках реки Свислочь (n=27)

Table 1

Correlation matrix of the Spearman coefficient between the parameters of the organic matter, seston and chlorophyll content in the reservoirs and the river Svisloch sections (n=27)

Параметры	ХПК, мгО ₂ /л	РОВ, мгО ₂ /л	ВОВ, мгО ₂ /л	Хлорофилл <i>a</i> , мкг/л	Сестон, мг/л
ХПК, мгО ₂ /л	1,0	—	—	—	—
РОВ, мгО ₂ /л	0,67*	1,0	—	—	—
ВОВ, мгО ₂ /л	0,89	0,34	1,0	—	—
Хлорофилл <i>a</i> , мкг/л	0,69	0,12	0,81	1,0	—
Сестон, мг/л	0,85	0,31	0,95	0,89	1,0

*Жирным шрифтом обозначены статистически значимые значения, $p < 0,05$

Как следует из представленных материалов, наиболее тесная корреляционная связь проявилась между содержанием хлорофилла *a* и ВОВ – 0,81. Высокая корреляционная связь ХПК с содержанием хлорофилла *a* – 0,69 определяется прежде всего содержанием динамической фракции ВОВ в его составе.

Спектральные характеристики воды на отрезке р. Свислочь в летний период 2016 г. Направление исследований РОВ по спектральным характеристикам в основном получило развитие в морских исследованиях. Работы, касающиеся изучения РОВ пресноводных экосистем, немногочисленны [3]. Первые результаты изучения спектральных характеристик воды озерных водоемов в Беларуси были получены на озерах разного трофического типа (Нарочь, Мястро, Баторино и Б. Швакшты) [7]. Согласно сформировавшимся общемировым представлениям по применению УФ-спектроскопии, для оценки количественного содержания РОВ автором были использованы коэффициенты светопоглощения α_{254} и α_{280} , а для описания качественного состава коэффициенты экспоненциального наклона $S_{275-295}$ (S1) и $S_{350-400}$ (S2) (уравнения расчета коэффициентов приведены в методах) и их соотношение (Sr), а также соотношения коэффициентов светопоглощения $\alpha_{250}:\alpha_{365}$ (E2:E3), $\alpha_{465}:\alpha_{665}$ (E4:E6). Изменения (E4:E6) отражают ароматичность вещества, а (E2:E3) относительный размер молекул. Было установлено, что коэффициенты светопоглощения α_{254} и α_{280} , соотношение E2:E3, E4:E6 и S1 изменяются согласно трофическому статусу озер, проявляя количественную взаимосвязь с параметрами органического вещества.

Качественный состав ОВ в водотоках, особенно в прибрежной зоне, может быть иным, чем в озерах, в силу возможности присутствия значительных количеств аллохтонного ОВ различного происхождения. Аналогично вышеизложенному алгоритму исследований, были изучены спектральные характеристики нативной (нефильтрованной) и фильтрованной воды водохранилищ и русловых участков рассматриваемого отрезка реки в летний период (июнь – август). В табл. 2 и 3 представлены величины спектральных параметров нефильтрованной воды водохранилищ и русловых участков реки. Значения коэффициентов абсорбции α_{254} и α_{280} в нефильтрованной воде закономерно изменялись вслед за изменением содержания взвешенных и органических веществ. Величины коэффициентов S2 и E4:E6, отражающих временные и пространственные различия качественного состава ОВ воды, оставались практически на близком уровне как в водохранилищах, так и на русловых створах.

Таблица 2

Спектральные параметры нативной воды в водохранилищах р. Свислочь

Table 2

Spectral parameters of native water in the reservoirs of Svisloch River

Водохранилища	Дата	α_{254} , М ⁻¹	α_{280} , М ⁻¹	$E_{250}:E_{365}$ E2:E3	$E_{465}:E_{665}$ E4:E6	S1 $S_{275-295}$	S2 $S_{350-400}$	S1/S2 Sr
Дрозды (за МКАД)	25.07.2016	41,7	31,6	4,33	2,10	0,017	0,009	1,943
	20.06.2016	37,0	27,5	5,01	1,94	0,018	0,009	2,052
	22.08.2016	52,7	38,1	4,12	1,67	0,018	0,006	2,824

Окончание табл. 2
Ending table 2

Дрозды (Веснянка)	20.06.2016	35,7	25,9	4,74	1,58	0,018	0,009	2,024
	22.08.2016	41,7	30,8	5,03	1,88	0,018	0,010	1,791
	25.07.2016	38,0	28,0	4,77	1,89	0,019	0,009	2,079
Заславское	20.06.2016	37,7	27,6	4,61	1,87	0,017	0,010	1,668
	22.08.2016	44,7	33,6	4,25	1,50	0,018	0,008	2,128
	25.07.2016	47,5	36,0	4,23	1,57	0,017	0,008	2,109
Комсомольское	08.06.2016	34,5	25,8	5,52	8,00	0,016	0,013	1,214
	25.07.2016	39,4	29,0	4,12	1,85	0,017	0,009	1,924
Комсомольское	20.06.2016	33,2	24,0	5,17	1,40	0,018	0,009	1,940
	22.08.2016	38,9	28,6	4,27	1,80	0,017	0,009	1,963
Чижевское	25.07.2016	40,5	29,7	3,75	1,53	0,014	0,007	2,022
	20.06.2016	40,1	30,9	3,45	1,47	0,015	0,006	2,359
	22.08.2016	115,2	93,3	2,45	1,78	0,011	0,004	2,562

Таблица 3

Спектральные параметры нативной воды на русловых участках р. Свислочь

Table 3

The spectral parameters of native water in the river Svisloch sections

Участок русла	Дата	α_{254}, M^{-1}	α_{280}, M^{-1}	$E_{250}:E_{365}$ $E2:E3$	$E_{465}:E_{665}$ $E4:E6$	S1 $S_{275-295}$	S2 $S_{350-400}$	S1/S2 Sr
Ул. Аранская	08.06.2016	32,7	24,9	4,10	4,50	0,019	0,012	1,653
	25.07.2016	41,9	31,1	3,62	1,56	0,016	0,007	2,159
	22.08.2016	42,9	32,4	3,73	1,47	0,017	0,006	2,592
	20.06.2016	—	41,2	0,00	1,46	0,014	0,007	2,016
Канал	25.07.2016	33,2	25,6	4,37	0,33	0,013	0,014	0,894
	20.06.2016	24,0	18,2	4,78	5,50	0,015	0,015	0,983
	22.08.2016	25,3	19,6	3,84	1,74	0,013	0,010	1,227
Футбольный манеж	25.07.2016	37,1	27,5	4,62	1,54	0,017	0,009	1,937
	20.06.2016	34,9	25,8	5,15	2,50	0,019	0,011	1,721
	22.08.2016	40,0	30,5	4,93	1,50	0,015	0,010	1,478
Шабаны	25.07.2016	40,2	32,0	3,06	1,48	0,013	0,005	2,582
	20.06.2016	—	41,1	0,00	1,34	0,012	0,005	2,548
	22.08.2016	40,6	30,9	3,36	2,03	0,015	0,005	2,857

Как следует из результатов, приведенных в табл. 4 и 5, при снижении величин коэффициентов абсорбции фильтрованной воды относительно нативной существенных отличий характера пространственных и временных изменений не наблюдалось. Остальные спектральные характеристики, отражающие качественный состав воды, в пробах нативной воды были ниже, чем в фильтрованной.

В водохранилищах, где заметную роль в формировании ОВ играют внутриводоемные процессы, значения спектральных параметров как нефильрованной, так и фильтрованной воды были несколько выше, чем на русловых участках водотока.

До настоящего времени взаимосвязь между содержанием ОВ и спектральными параметрами воды изучалась только для растворенной фракции органического вещества. Полученные результаты свидетельствуют, что значения коэффициентов абсорбции (α_{254} и α_{280}) нативной воды были закономерно выше, чем фильтрованной. Разница между ними в одной и той же пробе воды может служить показателем содержания взвешенного вещества. На рис. 5 представлен график зависимости между содержанием сестона и разностью величин абсорбции ($\Delta\alpha_{254}$) нативной и фильтрованной воды в водохранилищах р. Свислочь.

Таблица 4

Спектральные параметры фильтрованной воды водохранилищ р. Свислочь

Table 4

Spectral parameters of filtered water in the reservoirs of Svisloch River

Водохранилища	Дата	α_{254}^{λ} , м ⁻¹	α_{280}^{λ} , м ⁻¹	$E_{250}:E_{365}$ E2:E3	$E_{465}:E_{665}$ E4:E6	S1 S _{275–295}	S2 S _{350–400}	S1/S2 Sr
Дрозды (за МКАД)	25.07.2016	36,6	26,5	6,15	3,75	0,019	0,014	1,406
	20.06.2016	32,7	23,4	8,15	–	0,021	0,021	0,985
	22.08.2016	40,7	29,1	6,08	3,00	0,019	0,014	1,381
Дрозды (Веснянка)	20.06.2016	35,0	25,3	5,25	2,08	0,018	0,010	1,913
	22.08.2016	37,1	26,5	6,38	4,33	0,020	0,015	1,367
	25.07.2016	35,1	25,1	6,02	3,20	0,020	0,014	1,482
Заславское	20.06.2016	34,5	24,6	6,78	–	0,020	0,016	1,250
	22.08.2016	40,6	29,9	6,10	3,33	0,020	0,014	1,424
	25.07.2016	43,2	31,8	4,74	1,92	0,018	0,011	1,581
Комсомольское	08.06.2016	30,4	21,9	10,65	–	0,022	0,035	0,620
	25.07.2016	33,4	24,4	5,62	3,00	0,019	0,014	1,354
	20.06.2016	31,6	22,7	7,11	–	0,021	0,018	1,171
	22.08.2016	34,8	24,8	6,00	2,50	0,020	0,012	1,627
Чижевское	25.07.2016	32,7	23,5	5,48	2,25	0,017	0,014	1,269
	20.06.2016	32,2	23,0	7,38	–	0,020	0,020	0,979
	22.08.2016	89,2	69,1	3,24	2,27	0,014	0,007	1,916

Таблица 5

Спектральные показатели фильтрованной воды на русловых участках в р. Свислочь

Table 5

Spectral parameters of filtered water in the river Svisloch sections

Участок русла	Дата	α_{254}^{λ} , м ⁻¹	α_{280}^{λ} , м ⁻¹	$E_{250}:E_{365}$ E2:E3	$E_{465}:E_{665}$ E4:E6	S1 S _{275–295}	S2 S _{350–400}	S1/S2 Sr
Ул. Аранская	08.06.2016	27,8	19,6	12,09	–	0,021	–	–
	25.07.2016	34,8	25,3	5,61	2,22	0,019	0,013	1,497
	22.08.2016	34,4	24,5	5,77	2,29	0,020	0,012	1,637
	20.06.2016	41,9	30,2	5,74	3,40	0,017	0,015	1,151
Канал	25.07.2016	33,9	25,9	4,40	2,33	0,014	0,014	0,987
	20.06.2016	23,4	17,7	5,88	–	0,015	0,022	0,659
	22.08.2016	22,9	17,3	4,85	3,67	0,014	0,016	0,926
Футбольный манеж	25.07.2016	35,5	26,0	4,96	2,83	0,021	0,013	1,642
	20.06.2016	33,2	24,2	6,36	–	0,019	0,019	1,024
	22.08.2016	35,4	25,2	6,71	4,00	0,019	0,015	1,289
Шабаны	25.07.2016	30,7	22,2	6,15	3,20	0,019	0,014	1,361
	20.06.2016	35,8	25,3	6,23	–	0,017	0,015	1,162
	22.08.2016	32,5	23,0	5,67	2,25	0,020	0,012	1,675

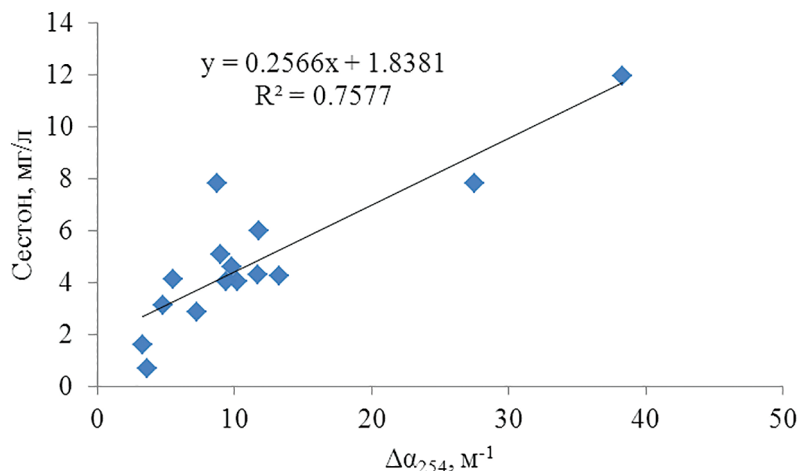


Рис. 5. Связь между общим содержанием сестона и разностью величин α_{254} в нефильтрованной и фильтрованной (1,0 мкм) воде в водохранилищах р. Свислочь (на графике отражены уравнение линейной зависимости и его коэффициент аппроксимации R^2)

Fig. 5. The relationship between the total content of seston and the difference in the values of α_{254} in unfiltered and filtered (1.0 μm) water in reservoirs of Svisloch river (the linear regression equation and its approximation coefficient R^2 is presented on the graph)

Для поиска наиболее значимых взаимосвязей между параметрами органического вещества, получаемых гидрохимическими методами, и спектральными параметрами воды был проведен корреляционный анализ изученных параметров. В табл. 6 представлены величины коэффициента корреляции Спирмена.

Таблица 6

Значения коэффициента Спирмена между спектральными параметрами
фильтрованной воды и содержанием органического ВВ в водохранилищах

Table 6

The values of the Spearman coefficient between the spectral parameters
of the filtered water and the organic matter content in the reservoirs

Параметры	α_{254}	α_{280}	E2:E3	E4:E6	$S_{275-295}$	$S_{350-400}$	Sr
ХПК, общ., $\text{мгO}_2/\text{л}$	0,58*	0,57	-0,46	-0,21	-0,64	-0,41	0,35
ВОВ, $\text{мгO}_2/\text{л}$	0,61	0,58	-0,33	0,15	-0,47	-0,33	0,37
РОВ, $\text{мгO}_2/\text{л}$	0,52	0,49	-0,30	-0,14	-0,54	-0,20	0,14
РОВ/ВОВ	-0,45	-0,43	0,29	0,20	0,52	0,18	-0,10
Хлорофилл, мкг/л	0,33	0,31	-0,26	0,04	-0,40	-0,18	0,10
Сестон, мг/л	0,47	0,45	-0,42	-0,23	-0,54	-0,31	0,22

*Жирным шрифтом обозначены статистически значимые значения, $p < 0,05$

Сравнительно тесная корреляционная зависимость в водохранилищах в летний период проявилась только между параметрами органического вещества и коэффициентами абсорбции α_{254} , α_{280} , а также коэффициентом экспоненциального наклона $S1$ ($S_{275-295}$). На протяжении вегетационного сезона 2016 г. коллективом авторов настоящей статьи были выполнены аналогичные наблюдения на озерах разного трофического типа (Нарочь, Мясстро, Баторино и Б. Швакшты). Мы нашли возможным в качестве сравнения привести значения коэффициента Спирмена для озерных водоемов. Взаимосвязь содержания органического вещества со спектральными характеристиками фильтрованной воды (фильтры 1,5 мкм) в озерах разного типа оказалась шире и с более высокими значениями. Обобщенные результаты представлены в табл. 7. Пока нельзя говорить о закономерности различий связи наблюдаемых параметров в озерах и водохранилищах, так как на озерах анализировали больший объем данных за более длительный срок наблюдений. Однако тесная связь содержания всех компонентов ОВ с коэффициентами абсорбции воды озерных водоемов и водохранилищ очевидна.

Таблица 7

Значения коэффициента корреляции Спирмена между спектральными характеристиками и параметрами ОВ в фильтрованной воде (фильтры 1,5 мкм) в озерных водоемах

Table 7

The values of the Spearman correlation coefficient between the spectral characteristics and the parameters of OM in filtered water (1.5 µm filters) in lake water bodies

Параметры	α_{254}	α_{280}	E2:E3	E4:E6	$S_{275-295}$	$S_{350-400}$	Sr
Сестон, крупноразмерная фракция, мг/л	0,76*	0,75	-0,63	-0,04	-0,67	0,56	-0,77
Сестон, общий, мг/л	0,73	0,72	-0,56	-0,02	-0,69	0,55	-0,79
Сорг., общ., мг/л	0,87	0,87	-0,62	-0,05	-0,84	0,56	-0,80
Сорг., взв., мг/л	0,76	0,75	-0,68	0,05	-0,69	0,49	-0,71
Сорг., раст., мг/л	0,89	0,89	-0,62	-0,06	-0,87	0,52	-0,79

*Жирным шрифтом обозначены статистически значимые значения, $p < 0,05$

Спектральные параметры фильтрованной воды дают характеристику только растворенной фракции ОВ, однако как в озерах, так и в водохранилищах р. Свислочь обнаруживается корреляционная связь спектральных характеристик с содержанием сестона, что не случайно. Живая компонента взвеси обеспечивает постоянное и непрерывное взаимодействие БОВ – РОВ. Поток вещества по каналу БОВ – РОВ является важнейшим механизмом функционирования водных экосистем.

Заключение

Таким образом, нами изучена динамика и пространственное распределение общего содержания и компонентного состава органического вещества (РОВ, БОВ, хлорофилл *a*) в летний период 2016 г. в прибрежной зоне отрезка р. Свислочь (от верховья водотока до выхода из г. Минска в микрорайоне Шабаны). За исключением верхнего створа, водоток сильно эвтрофирован с нарастанием трофности воды вниз по течению. В Чижовском водохранилище в периоды интенсивного «цветения» цианопрокариотами (синезелеными водорослями) возникает высокий уровень вторичного загрязнения. Впервые в Беларуси оценена информативность спектрального анализа воды как метода для изучения количественных и структурных характеристик ОВ в водохранилищах и речных участках водотока. Установлена закономерная связь между характером спектра абсорбции воды и количественными показателями ОВ в озерах и водохранилищах, где приоритетную роль в формировании общего пула ОВ играют биологические процессы. Для речных участков, где возможно значительное поступление аллохтонного органического вещества, такая связь отсутствует. Дополнительные исследования в этом направлении помогут расширить понимание спектральных характеристик природных вод и их применение для оперативного экологического мониторинга.

Библиографические ссылки

1. SCOR-UNESCO Working group № 17. Determination of photosynthetic pigments in sea-water. In: *Monographs on Oceanologic Methodology*. UNESCO. Paris: [publisher unknown]; 1966. p. 9–18.
2. Остапеня АП. Полнота окисления органического вещества водных беспозвоночных методом бихроматного. *Доклады АН БССР*. 1965;9(4):273–276.
3. Helms JR, Stubbins A, Ritchie JD, et al. Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter. *Limnology and Oceanography*. 2008;53:955–969.
4. Weishaar JL, Aiken GR, Bergamaschi BA, et al. Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon. *Environmental Science Technology*. 2003;37:4702–4708.
5. Chen H, Zheng B, Song Y, et al. Correlation between molecular absorption spectral slope ratios and fluorescence humification indices in characterizing CDOM. *Aquatic Sciences*. 2011;73:103–112.
6. Sokal RR, Rohlf JF. Biometry: the principles and practice of statistics in biological research. New-York : W. H. Freeman and Company; 2001. 887 p.
7. Верес ЮК. *Органическое вещество, его компонентный состав и деструкция в воде озер разного трофического типа* [автореферат диссертации]. Минск: [б. н.]; 2013. 23 с.

References

1. SCOR-UNESCO Working group № 17. Determination of photosynthetic pigments in sea-water. In: *Monographs on Oceanographic Methodology*. UNESCO. Paris: [publisher unknown]; 1966. p. 9–18.
2. Ostapenya AP. Completeness of the oxidation of organic matter of aquatic invertebrates by the method of bichromatic oxidation. *Doklady AN BSSR* [Report of ASci of BSSR]. 1965;9(4):273–276. Russian.
3. Helms JR, Stubbins A, Ritchie JD, et al. Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter. *Limnology and Oceanography*. 2008;53:955–969.
4. Weishaar JL, Aiken GR, Bergamaschi BA, et al. Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon. *Environmental Science Technology*. 2003;37:4702–4708.
5. Chen H, Zheng B, Song Y, et al. Correlation between molecular absorption spectral slope ratios and fluorescence humification indices in characterizing CDOM. *Aquatic Sciences*. 2011;73:103–112.
6. Sokal RR, Rohlf JF. Biometry: the principles and practice of statistics in biological research. New-York: W. H. Freeman and Company; 2001. 887 p.
7. Veres JuK. *Organicheskoe veshchestvo, ego komponentnyj sostav i destruciya v vode ozer raznogo troficheskogo tipa* [Organic matter, its component composition and destruction in the water of lakes of different trophic type] [PhD thesis]. Minsk: [publisher unknown]; 2013. 23 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 29.03.2019.
Received by editorial board 29.03.2019.