

Текст научного доклада Сухорукова Б.Л. на тему: «РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ ГИДРООПТИКИ В ДИСТАНЦИОННОМ МОНИТОРИНГЕ ПРЭСНОВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ»

для очного участия во Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНЫХ ВЫЗОВОВ: ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ, УПРАВЛЕНИЕ, МОНИТОРИНГ», которая пройдет в г. Ростов-на-Дону, 20 – 23 сентября 2023 года.

Излучательные свойства (восходящее от воды излучение) водных объектов определяются всеми химическими и биологическими компонентами, находящимися в воде. Они могут находиться в воде в виде взвешенных частиц, истинных растворов, атомов, молекул и их ионов, в живых клетках биоты, образовывать различные комплексы. Восходящее от воды излучение, может быть зарегистрировано приборами дистанционного контроля наиболее эффективно в виде спектров восходящего от воды излучения или спектров коэффициентов спектральной яркости (СКСЯ). Таким образом, СКСЯ является интегральным "отпечатком состояния", оптическим образом состояния водной экосистемы, ее абсолютно объективной характеристикой.

По определению, коэффициент спектральной яркости (КСЯ) $\rho(\mu, \mu_0, \varphi, E_\lambda)$ (*reflectance*) – есть отношение спектральной плотности энергетической яркости исследуемой поверхности $V_\lambda(\theta, \varphi, E_\lambda)$ к спектральной плотности энергетической яркости идеально рассеивающей эталонной поверхности $V_\lambda(\theta', \varphi)$ т.е.:

$$\rho_\lambda(\theta, \varphi, E_\lambda) = V_\lambda(\theta, \varphi, E_\lambda) / V_{0, \lambda}(E_\lambda) \quad (1)$$

В приближении «анизотропного рассеяния при заметном поглощении» получено упрощенное выражение, связывающее КСЯ с концентрацией оптически активных (видимых) компонентов (ОАК), присутствующих в воде, изменяющих комплексный показатель преломления излучения в видимой области:

$$\rho(\lambda) = \frac{\sum_i \sigma_i^\gamma(\lambda) C_i + \alpha_{\text{воды}}(\lambda) + 0,5 \sigma_{\text{воды}}(\lambda) + w_{\text{хл}}(\lambda) C_{\text{хл}} + w_{\text{фб}}(\lambda) C_{\text{фб}}}{\sum_i (\alpha_i(\lambda) + \Phi_i(\lambda) \sigma_i(\lambda)) C_i} \quad (2)$$

где $\alpha_i, \sigma_i, \sigma_i^\gamma$ - удельные показатели поглощения, рассеяния и рассеяния под углом γ i -ого ОАК с концентрацией C_i или воды, w – удельный выход флуоресценции хлорофилла или фикобилина, $\Phi_i(\lambda)$ – интеграл от индикатрисы рассеяния, который воспроизводит долю света, рассеянного в заднюю полусферу частицами сорта i , λ - длина волны, для которой выполняется расчет. Здесь и далее использованы следующие сокращения названия ОАК: мвв-минеральные взвешенные вещества, фп-фитопланктон, РОВ-растворенные органические вещества, хл-хлорофилл a , к-каротиноиды, фц-фикоцианин фитопланктона. Упрощение состоит в том, что при расчетах первичные гидрооптические характеристики $\alpha_i, \sigma_i, \sigma_i^\gamma, \Phi_i(\lambda)$ выбирают для ОАК с конкретными характеристиками, плотностью, функцией распределения частиц по размерам, формой частиц, видовым составом фитопланктона и т.д., тогда, как в пробах воды указанные параметры этих компонентов не контролируются и разнообразие этих компонентов может приводить и приводит к разнообразным особенностям формы СКСЯ.

На основе этой оптической модели было создано программное обеспечение, позволяющее моделировать СКСЯ, варьируя влияние видимых ОАК, как за счет изменения C_i , так и за счет изменения формы $\alpha_i(\lambda)$ пигментов фитопланктона (спектров показателя

поглощения (СПП), включая их соотношение в клетке фитопланктона. Именно вариация СПП и возможные вариации $\Phi_i(\lambda)$ при одинаковых C_i и определили новизну результатов, полученных в сообщении.

Как видно из выражения (2) в знаменателе стоит произведение $\sigma_i(\lambda)C_i$, что указывает на возможность изменения СКСЯ не за счет изменения C_i фитопланктона, а за счет изменения $\alpha_i(\lambda)$ фитопланктона различного таксономического состава.

Дистанционную съемку водных объектов и эталона выполняли спектрометром S41, производства фирмы «SolarLS». Спектральный диапазон прибора – 389–808 нм, спектральное разрешение 1,8 нм. В экспедициях проведена спектрометрическая съемка водных объектов, отобраны пробы воды, в лабораторных условиях рассчитаны C_i пигментов фитопланктона (таблица 1), определен их таксономический состав (таблица 2).

Таблица 1 – Содержание пигментов фитопланктона и фикоцианина в Цимлянском водохранилище и на р. Дон

Дата	Станция	Концентрация пигментов фитопланктона и фикоцианина (мкг/дм ³)				
		$C_{хл a}$	$C_{хл b}$	$C_{хл c}$	$C_{хл общ}$	$C_{ФЦ}$
27.08.2020	ст. 1	88,01	5,01	3,80	96,82	86,9
-«-	ст. 2	167,02	6,93	2,21	176,16	11,9
-«-	ст. 12	62,41	3,59	3,04	69,04	100,3
11.04.2022	ПБ	21,79	0,003	20,65	42,44	н/опр
11.05.2022	ФВ	23,97	0	19,90	43,87	н/опр
29.06.2022	ПБ	3,84	0,22	4,13	8,19	н/опр

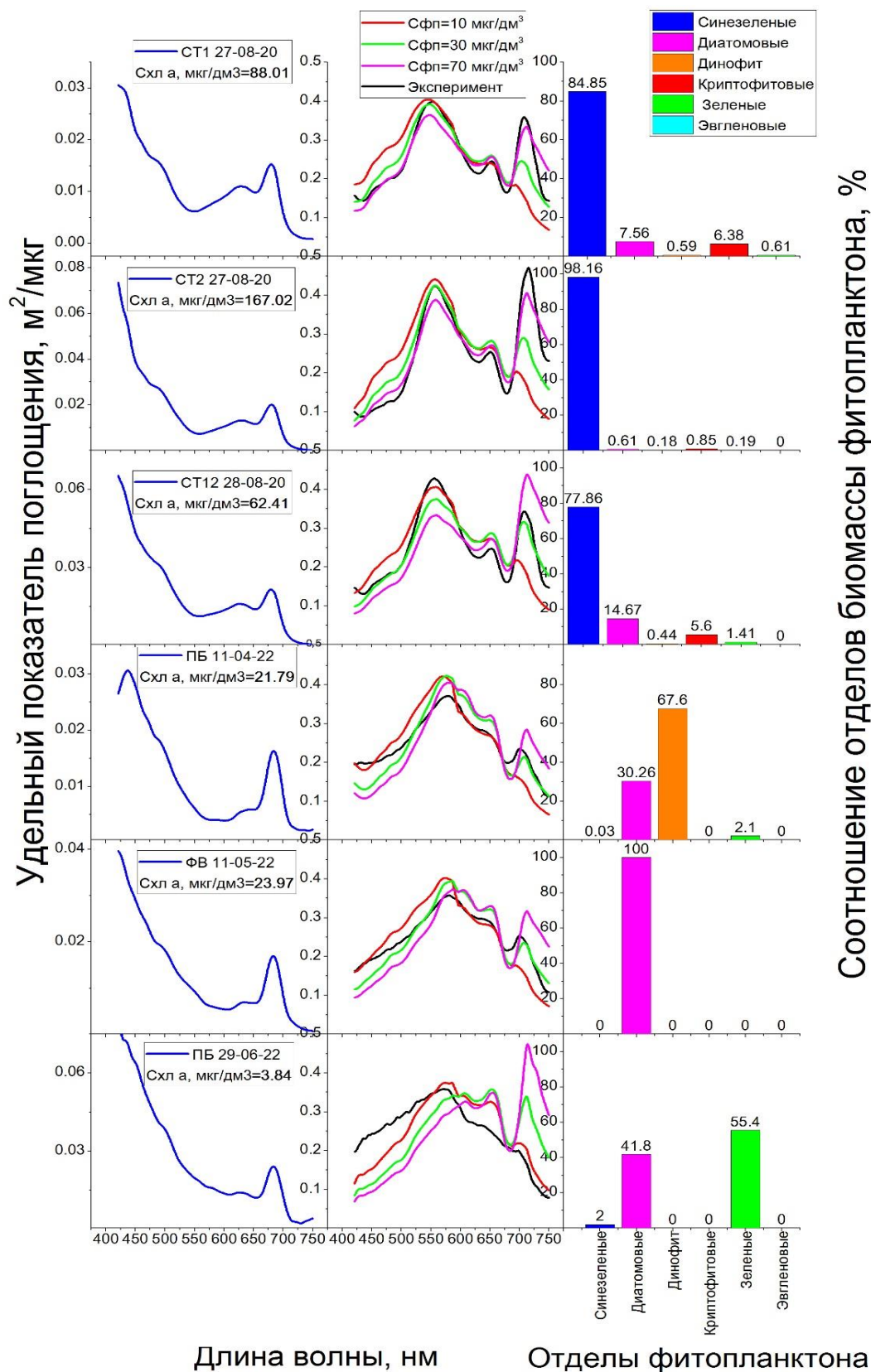
Примечание: ПБ – правый берег; ФВ – фарватер (западный мост г. Ростов-на-Дону); «н/опр» – не определяли

Таблица 2 – Таксономический состав фитопланктона на отдельных станциях Цимлянского водохранилища и р. Дон

Дата	Станция	Отделы фитопланктона				
		Синезеленые	Диатомовые	Динофитовые	Зеленые	Криптофитовые
27.08.2020	ст.1	28547,2	2542,2	197,3	209,9	2146,3
		84,8	7,6	0,6	0,6	6,4
-«-	ст.2	159773,5	998,6	296,2	316,1	1389,0
		98,2	0,6	0,2	0,2	0,9
-«-	ст.12	38051,0	7169,2	217,0	690,0	2737,8
		77,9	14,7	0,4	1,4	5,6
11.04.2022	ПБ	0,53	570,21	1273,7	39,62	отс
		0,03	30,3	67,6	2,1	
11.05.2022	ФВ	отс	487,06	отс	отс	отс
			100,0			
29.06.2022	ПБ	8,35	125,6	отс	166,4	отс
		2,8	41,8		55,4	

Примечание: «отс» – отсутствие в составе фитопланктона;
Дроби: биомасса отдела в мг/м³ – числитель, доля, в % – знаменатель)

На рисунке систематизированы полученные результаты спектрометрических экспериментальных измерений и модельных расчетов.



Соотношение отделов биомассы фитопланктона, %

Рисунок – Совместные спектры показателя поглощения (слева), коэффициента спектральной яркости (нормированные – средний ряд) и таксономического состава фитопланктона (справа) для станций 1, 2, 12 Цимлянского водохранилища и р. Дон

Для каждой из приведенных в таблице 2 станций каждый ряд представлен в виде соответствующих удельных СПП, нормированных СКСЯ и таксономического состава фитопланктона.

Правый столбец рисунка иллюстрирует, большую концентрацию хлорофилла a – 88 и 62 мкг/дм³ и фикоцианина – 87 и 100 мкг/дм³ на станциях 1 и 12. По биомассе фитопланктона синезеленых – 84,8 и 77,9% и 7,6 и 14,7% – диатомовых соответственно.

Для ст. 2 отмечается высокое содержание хлорофилла a – 167 мкг/дм³, и небольшая концентрация фикоцианина – 11 мкг/дм³. Анализ биомассы водорослей показал преобладание в Цимлянском водохранилище цианобактерий – 98 % от суммарного показателя, и высокие значения биомассы (см. рисунок) на исследованной акватории водохранилища они варьировали от 28547 до 38541 мг/дм³ с локальной вспышкой до 159773 мг/дм³ на ст. 2. По таким количественным показателям развитие цианобактерий характеризовалось от «умеренного» до «интенсивного» цветения воды со вспышкой «гиперцветения» на ст. 2. На р. Дон в пробах за апрель концентрация хлорофилла a и c примерно одинакова около 20 мкг/дм³, что подтверждает форма СПП, а таксономический состав говорит о преобладании динофитовых – 67,6%, диатомовых 30%. В мае концентрация хлорофилла a всего 23,97 мкг/дм³, по таксономическому составу доминируют диатомовые, и составляют 100%. В июне в пробах р. Дон концентрация хлорофилла a и c почти одинакова и составляет около 4 мкг/дм³, хлорофилла b – 0,22 мкг/дм³, а изменение СПП и таксономический состав соответствует 41,8% – диатомовых и 55,4% – зеленых.

Такое различие таксономического состава фитопланктона определяет и существенное отличие их СПП, которые представляют суперпозицию СПП отдельных пигментов. Известно, что для хлорофилла a «красное» поглощение в клетке наблюдается на длине волны 670–675 нм, основное, в синей области – на длине 440 нм, хлорофилла b – на длинах волн 469 и 651 нм, хлорофилла c – 460, 584,5 и 635 нм; для фикоцианина максимум поглощения в области от 610 до 635 нм. Зная из литературы СПП различных пигментов фитопланктона возможно строить модельный СПП фитопланктона для каждой из станций с учетом полученных в табл. 2 процентных соотношений. В результате должны получаться СПП приведенные на рис. в левой колонке. Однако, полученные модельные спектры поглощения абсолютно не совпадают с экспериментально измеренными.

Соответственно, форма модельных СКСЯ, рассчитанных с модельными СПП, далека от реальной. Иной результат получаем при расчете модельных СКСЯ, рассчитанных с экспериментально измеренными СПП. В средней колонке рисунка представлено сопоставление экспериментально измеренных и модельных СКСЯ. Причем, рассчитываем СКСЯ с различными концентрациями хлорофилла a : 10, 30, 70 мкг/дм³.

Получено удовлетворительное совпадение формы экспериментальных и модельных СКСЯ, причем концентрации хлорофилла a фитопланктона, достаточно хорошо совпадает с аналитически определенными величинами. Наблюдаются хорошие совпадения формы экспериментальных и модельных СКСЯ для ст.1, 2, 12 Цимлянского водохранилища от 27.08.20 и р. Дон от 11.04.22 ст. ПБ и ФВ.

Вместе с тем, отмечено неудовлетворительное совпадение формы СКСЯ для р. Дон от 29.06.22. Устранить это расхождение удастся варьируя значения $\Phi_i(\lambda)$ в выражении (2).

Таким образом, получена уникальная экспериментальная информация в виде удельных СПП сообщества фитопланктона р. Дона и Цимлянского водохранилища (первичных гидрооптических характеристик). Она приобретает особую ценность благодаря тому, что получена параллельно с определением таксономического состава фитопланктона и его биомассы, выполненного хорошо апробированным методом. Модельные СКСЯ, рассчитанные с полученными СПП, передают основные спектральные особенности экспериментальных данных.