

РАЗВИТИЕ МЕТОДА ДИСТАНЦИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧЕ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ

Сухоруков Б.Л.

Институт водных проблем РАН, Гидрохимический отдел,
г. Ростов-на-Дону
bls-phys@yandex.ru

Интерпретация данных всех физических измерений заключается в нахождении соответствия различных излучательных свойств объекта их характеристикам, полученным в механических, химических, биологических опытах. При этом в ряде случаев физическая информация об объекте значительно полнее, чем полученная иными методами, но для осознания её информативности требуется «перевод» на язык, более понятный для наблюдателя: химический, биологический и др.

При интерпретации данных дистанционных спектрометрических измерений наиболее очевидные результаты получают при построении биооптических (регрессионных) моделей вида:

$$C_i = f(RP_i),$$

где концентрация i -го видимого (оптически активного) компонента водной экосистемы, RP_i – радиационный параметр, представляющий собой комбинацию из интенсивностей дистанционно измеренного сигнала на нескольких длинах волн видимого диапазона спектра. Наиболее распространены биооптические модели, в которых определяют концентрации растворенных органических веществ (*С_{ров}*), минеральных взвешенных веществ (*С_{мв}*), а также хлорофилла *a* фитопланктона, *С_{хл}*. Обзор современных работ по построению биооптических моделей приведен в работе [1].

В ранних работах автора была высказана гипотеза о том, что восходящее из водной экосистемы излучение значительно более информативно, чем принято считать при использовании его для определения концентраций видимых (оптически активных) компонентов. Основанием для предложенной гипотезы послужили следующие экспериментальные факты.

Спектры коэффициентов яркости (КЯ) водных экосистем, полученные современной спектральной аппаратурой в видимой об-

ласти с разрешением менее 2 нм, несмотря на свою кажущуюся «похожесть», могут заметно различаться в деталях: сдвиги максимумов, появление двойных максимумов, отличных от симметричных и другие спектральные «особенности». На рис. 1 приведены спектры КЯ, с указанием спектрального положения (длин волн) основных особенностей, о которых будет упомянуто ниже. В литературе существуют работы, в которых дана интерпретация части этих особенностей, но в целом структура спектров КЯ до конца не объяснена.

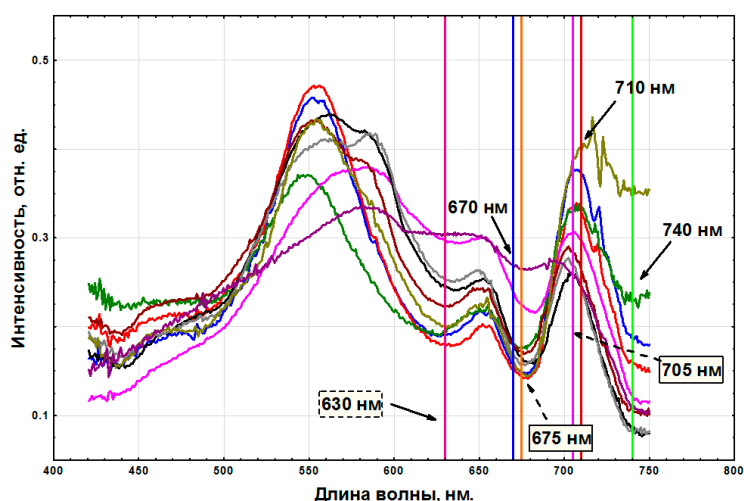


Рис.1 – Экспериментальные спектры КЯ, полученные на различных водных объектах. Стрелками указаны длины волн, на которых выполняют измерения интенсивности КЯ при построении биооптических моделей

В биооптических моделях для характеристики фитопланктона, а точнее концентрации хлорофилла *a*, измеряют интенсивности спектров КЯ только на двух или трех длинах волн: 675, 705 нм, или 670, 710, 740 нм [1]. Но при этом из рассмотрения исключают диапазон вблизи 630 нм, с очевидностью указывающий на присутствие в фитопланктоне синезеленых водорослей (рис. 1). Кроме того, не учитывают измерения в других диапазонах, где спектральные изменения происходят с большой долей вероятности за счет изменения структурного состава фитопланктона.

В связи с изложенным выше предложен принципиально иной метод интерпретации спектрометрической информации – яркости

восходящего от воды излучения, позволяющий наблюдать за внутриводоемными процессами в водных экосистемах: метод пространства оптических образов (ПОО) [2, 3]. ПОО строят с использованием всех возможных экспериментальных спектров КЯ видимой области электромагнитного спектра (теоретически – *все возможные экспериментальные спектры всех водных объектов на Земле*), полученных на различных доступных водных объектах, а также большого количества модельных спектров, рассчитанных на основе использования теории переноса [4, 5]. Модельные спектры необходимы для создания пространства с устойчивыми статистическими параметрами при добавлении в ПОО новых экспериментальных спектров. В расчетах модельных спектров в [2, 3] варьировали только концентрации видимых компонентов при постоянном показателе поглощения фитопланктона, полученного из литературных источников.

ПОО образуют сжатые до трехмерных спектры коэффициентов яркости водных экосистем. Соответственно, это пространство строится в обобщенных координатах (ОК) ОК1, ОК2, ОК3. Общее количество спектров, использованных для построения пространства – около 500 экспериментальных и несколько тысяч модельных. В ПОО легко проследить за изменением положения спектров КЯ и, считая, что форма спектров КЯ связана и (или) определяется состоянием водной экосистемы, траектория, построенная по спектрам КЯ, фактически является траекторией внутриводоемного процесса водного объекта. Здесь и ниже рассматривается «форма кривой спектральной плотности коэффициента яркости». В дальнейшем вместо столь длинной формулировки вводится сокращение «форма спектра коэффициента яркости (КЯ)» или «форма спектра (КЯ)». В таком пространстве, созданном с использованием модельных спектров, удастся построить изоплоты $S_{хл}$, $S_{мв}$, и в этих координатах траектория изменения состояния экосистемы легко интерпретируема. Однако совместный анализ спектрометрических и аналитических данных показал, что спектры КЯ имеющие различную форму, но одинаковые концентрации хлорофилла a , $S_{хл}$, могут попадать в различные области ПОО. Отсюда следует вывод, что форма спектров КЯ не может быть описана моделью, в которой достаточно изменять только концентрации видимых (оптически активных) компонентов.

Предположим, что проблема может быть решена при учете изменения видового состава фитопланктона. Такой учет можно выполнить в случае расширения списка варьируемых исходных данных модели, в частности показателя поглощения монокультур фитопланктона. Работы с результатами измерений этих спектров появились в литературе в последние годы в большом количестве [6, 7]. Однако удовлетворительные результаты по расчету спектров КЯ получили только тогда, когда исходные данные – спектры поглощения фитопланктона определяли на основе оригинальных *экспериментальных измерений проб воды*, отобранных синхронно со спектрометрической съемкой и профильтрованной через мембранные или стекловолоконные фильтры. Методика измерений спектров поглощения соответствует рекомендациям работ по «измерению спектров поглощения на увлажненных фильтрах» [6,7]. Спектры показателей поглощения получают с помощью того же портативного спектрометра, S41, которым выполняют дистанционную спектрометрическую съемку.

В результате использования в расчетах показателей поглощения, измеренных 13 февраля 2015 г. (доминирование динофитовых и диатомовых) и 13 августа 2014 г. (доминирование синезеленых и эвгленовых) получено ПОО, представленное на рис. 2, где преобразованные экспериментальные спектры КЯ помечены открытыми кружками, модельные – треугольниками и квадратами. На вынесенных рисунках показаны отдельные непреобразованные спектры КЯ. Сплошной линией обведены поверхности, полученные из модельных спектров с доминированием зеленых и синезеленых микроводорослей (треугольники) и диатомовых (открытые кружки).

Как следует из рис. 2, эти поверхности представляют собой своеобразные изолированные, неперекрывающиеся между собой «лепестки», практически сходящиеся в точке с обобщенными координатами $OK1=1,5$; $OK2=-1,5$ и $OK3=1,5$. В этой точке концентрация $C_{фп}=1 \text{ мг/дм}^3$, $C_{мв}=0$. В пределах каждого лепестка располагаются изоплеты, но уже помеченные индексами (в) – весна или (л) – лето, соответствующими использованным спектрам показателей поглощения или определенному таксономическому составу фитопланктона. Выделены поверхности, построенные по показателям поглощения, измеренным весной и летом.

В качестве примера на рис. 2 сплошная линия с заполненными кружками представляет собой траекторию изменения состояния

водной экосистемы р. Дон (съемка проводилась с моста через р. Дон в 2012 г. в пяти точках по разрезу реки). Представлена траектория, полученная по данным, собранным на фарватере реки на расстоянии ~ 150 м от правого берега. Траектория изменения КЯ р. Дон, (фарватер) в 2012 г. нанесена сплошной линией; вынесены спектры КЯ, соответствующие точкам траектории.

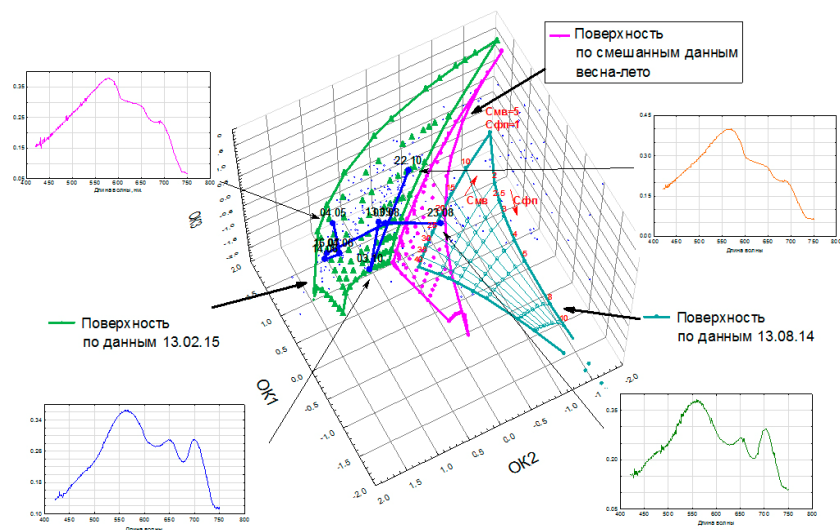


Рис.2 – Трехмерное пространство оптических образов, построенное по экспериментальным (точки) и модельным спектрам КЯ

Первая съемка проводилась 04.05, последующие – с периодичностью около двух недель. Практически все точки (спектры) попадают на первый лепесток, построенный по показателю поглощения, полученному в феврале, что указывает на то, что в экосистеме преобладают диатомовые водоросли с незначительной примесью синезеленых и, еще менее зеленых микроводорослей. Однако спектр, полученный 23.08, попадает на поверхность второго лепестка, что говорит о резком изменении состояния экосистемы в этот промежуток времени. Структура спектра КЯ на выноске показывает, что в этот промежуток времени наблюдалось цветение синезеленых, о чем свидетельствует минимум в спектре КЯ на длине волны 630 нм, и соответствующий максимум в спектре поглощения на этой длине волны. По данным аналитических определений 2012 год отличался

от других тем, что цветение воды было очень позднее и чрезвычайно кратковременное.

Таким образом, на основе использования в модельных спектрах КЯ экспериментально измеренных спектров поглощения фитопланктона усовершенствован метод построения ПОО и интерпретации дистанционных спектрометрических данных. Интерпретацию экспериментальных измерений проводят в объемном трехмерном пространстве. Изоплеты строят для каждой плоскости, определяемой таксономическим составом фитопланктона. Основные отделы фитопланктона образуют своеобразные «лепестки», теоретически сходящиеся в одной точке ПОО при $C_{fp}=0$, $C_{mv}=0$.

Впервые показано, что по дистанционно измеряемой спектрометрической информации высокого спектрального разрешения возможно на качественном уровне определять таксономический (структурный) состав фитопланктона. Траектория оптического образа либо меняется в плоскости «лепестка», показывая изменение концентрации видимых компонентов водной экосистемы, либо переходит с одного «лепестка» на другой, указывая на изменение таксономического состава фитопланктона. Естественно, возможно попадание спектров и между лепестками, что говорит о смешанном составе фитопланктона во время проведения съемки.

Предложенный подход существенно расширяет понятийный базис метода пространства оптических образов, предложенного в ранних работах автора, и позволяет вплотную подойти к решению задачи оценки *состояния водных экосистем* по данным дистанционной спектрометрии.

Литература

1. Odermatt D., Gitelson A., Brando V.E., Schaepman M. Review of constituent retrieval in optically deep and complex waters from satellite imagery // Remote Sensing of Environment. 2012. V. 118. P. 116–126.
2. Garbuzov G.P. & Sukhorukov B.L. Investigation of ecological state of water bodies according to the remotely sensing optical spectra // Proc. 1st Int. Airborne Remote Sensing Conf. and Exhibit. – Strasbourg, France. – 1994. – Vol. 3. – P. 37–45.
3. Сухоруков Б.Л., Гарбузов Г. П., Никаноров А.М. Оценка состояния водных объектов по спектрам коэффициента яркости // Водные ресурсы. 2000. № 5. – С. 579-588.
4. Голубицкий Б.М., Левин И.М., Танташев М.В. Коэффициент

яркости полубесконечного слоя морской воды //Известия АН СССР. Сер. ФАО. 1974. Т.10, №11. – С.1235–1238.

5. Зеке Э.П. Инженерные методы расчета световых полей в условиях многократного рассеяния //Распространение света в дисперсной среде. Минск: Наука и техника. –1982. – С.84–105.

6. Tassan S., Ferrari G.M. An alternative approach to absorption measurements of aquatic particles retained on filters // Limnol., Oceanogr. – 1995. – 40 (8). – P. 1358 – 1368.

7. Чурилова Т.Я., Финенко З.З., Акимов А.И. Пигменты микроводорослей/ Микроводоросли Черного моря: проблемы сохранения биоразнообразия и биотехнологического использования. Севастополь: ЭКОСИ – гидрофизика. 2008. С. 301 – 319.

ОЦЕНКА АНТРОПОГЕННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ГИДРОХИМИЧЕСКОГО СТОКА ГОРОДСКОГО ВОДОТОКА¹⁶

Фащевская Т.Б.

Институт водных проблем РАН, г. Москва

tf.ugatu@yandex.ru

Гидрохимический состав водных объектов формируется почвенно-геологическими и климатическими условиями, а также антропогенной деятельностью на водосборе. Наиболее интенсивное и сложно оцениваемое антропогенное воздействие водные объекты испытывают в пределах урбанизированных территорий. В городах ведется разнообразная хозяйственная деятельность по преобразованию поверхности водосбора и изменению путей и скорости миграции химических веществ в водные объекты. В городах сконцентрированы многочисленные источники дополнительного поступления в водные объекты химических веществ: предприятия различных отраслей экономики, жилищные объекты, городская инфраструктура, свалки бытовых отходов, полигоны-накопители промышленных отходов, полигоны подземного захоронения сточных вод и др.

Для планирования на водосборе оптимального состояния городского водотока и уменьшения поступления в него загрязняющих веществ до величин, обусловленных физико-географическими ус-

¹⁶Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-05-09022 а).