

Текст научного доклада Сухорукова Б.Л. на тему: «СОСТОЯНИЕ ПРЕСНОВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ»

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.

Спутниковый мониторинг пресноводных водных объектов с использованием спектральной аппаратуры высокого разрешения, порядка 2 нм, обладает уникальными возможностями по сравнению с традиционными методами мониторинга, реализованными в РФ в рамках государственной наблюдательной сети Росгидромета. Это возможность глобальности и одновременно оперативного регулярного получения информации, что позволяет наблюдать за внутриводоемными (экосистемными) процессами на территории всей планеты. Естественные ограничения – малое спектральное и пространственное разрешение, зависимость от погодных условий делают этот метод «дополнительным» в системе мониторинга.

В настоящее время пока нет полностью достоверных алгоритмов интерпретации спутниковой информации различных уровней обработки: радиометрической, геометрической и, в особенности, атмосферной коррекции, что может приводить к недостоверной информации, попадающей к конечному потребителю. Именно с этой целью – получения достоверной информации из спутниковых измерений – и проводят аналогичные дистанционные спектрометрические измерения на нижнем уровне, с борта судна, БПЛА или гидротехнических сооружений или мостовых переходов. Интеркалибровка позволяет внести нужные поправки в алгоритмы обработки спутниковой информации.

Рассмотрим подробнее возможности интерпретации информации нижнего уровня. В дистанционном мониторинге решают стандартную обратную задачу: по восходящему от воды излучению определяют характеристики исследуемого объекта – водной экосистемы. Восходящее от воды излучение регистрируют в виде спектра яркости, одновременно регистрируют облученность экосистемы и, затем, рассчитывают спектр коэффициента спектральной яркости, (СКСЯ). Последний используют, чаще всего, для построения биооптических моделей, (БОМ), связывающих концентрации оптически активных (видимых) компонентов с регистрируемым сигналом и определения концентраций оптически активных (видимых) компонентов, изменяющих комплексный показатель преломления.

Однако такое «узкое» использование СКСЯ не всегда оправдано. Можно, при формально одинаковой по БОМ концентрации компонента, увидеть различную форму СКСЯ, что, можно отнести как изменение неких интегральных свойств экосистемы – состояния водной экосистемы (СВЭ).

Таким образом, СКСЯ, как оптический образ экосистемы, несет в себе две функции: «информацию для определения концентраций ОАК», намеренно ограниченную для решения конкретных задач, и «полную», учитывающую всевозможные химические, физические и биологические взаимодействия для определения СВЭ, по форме СКСЯ. Задача определения концентраций ОАК практически решена, количество работ на эту тему огромно.

Задача же определения СВЭ по дистанционным оптическим измерениям не нашла еще общепринятого решения. Очевидно, что указанная задача состоит из нескольких этапов. На первом этапе в результате проведения так называемых подспутниковых экспериментов

синхронно собирают спектрометрическую информацию, в виде СКСЯ, и опорную гидрохимическую и гидробиологическую.

Второй этап заключается в формальной классификации (кластеризации) массива СКСЯ. Возможно применение различных статистических методов. На третьем этапе выполняют сопоставление спектрометрической и опорной информации, наполняют полученную математическую структуру экологическим содержанием. На этом этапе возможно использовать методы математического моделирования, так как собрать «полную» опорную информацию практически невозможно. Формально выполненная классификация может наполняться экологическим содержанием длительное время, что зависит от поставленных задач и развития науки в целом.

Теория светорассеяния позволяет получить решения для коэффициента спектральной яркости (ρ), как в общем виде, так и в различных приближениях, для вод различного типа с различным соотношением первичных гидрооптических характеристик: различных соотношениях рассеивающих и поглощающих свойств водной среды. В приближении «сильной анизотропии с заметным поглощением» типичным для поверхностных вод получено следующее выражение:

$$\rho(\mu, \mu_0, \psi) = \frac{A \cdot \chi(\cos \vartheta_0)}{4 \cdot (\mu + \mu_0) \cdot [1 - A \cdot \Phi(\mu, \mu_0)]} \quad (1)$$

здесь A – вероятность выживания фотона, равная отношению интегрального показателя рассеяния σ среды к его экстинкции ε , $\chi(\cos \vartheta_0)$ – индикатриса рассеяния изучаемой среды, параметры μ, μ_0, ψ характеризуют условия съемки.

В случае пренебрежения учетом индикатрисы рассеяния, для фиксированной длины волны, получено упрощенное выражение, связывающее коэффициент яркости восходящего от воды излучения с концентрацией видимых, изменяющих комплексный показатель преломления излучения в видимой области, компонентов, присутствующих в воде.

Упрощение состоит в том, что при расчетах первичные гидрооптические характеристики $\alpha_i, \sigma_i, \sigma_i^y, (\lambda)$ а также индикатрису рассеяния 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 к разнообразным особенностям формы СКСЯ.

С учетом этой скрытой многозначности гидрооптических характеристик мы вводим понятие состояния водной экосистемы по оптическим данным, как отражение (образ) интегральной характеристики состояния экосистемы.

На первом этапе была сформирована база данных СКСЯ совместно с опорными данными, состоящими из концентраций ОАК: хлорофилла a фитопланктона и минеральных взвешенных веществ.

Для реализации второго этапа выбран массив СКСЯ, полученных на водных объектах РФ, в основном, юга России: реках Дон, Волга, Кубань, Темерник; Цимлянском водохранилище, Таганрогском заливе Азовского моря, а также озере Байкал.

Выполнена кластеризация 80 СКСЯ по дивизимному методу Варда. Специфика этого дивизимного метода кластеризации в том, что деление общего массива на кластеры проводится до тех пор, пока получаемые кластеры (в настоящей работе форма СКСЯ) находят осмысленную интерпретацию. Так, средние СКСЯ на рис. а) и б) очевидно разделяются по форме: на рис. а) относится к водам 1 типа, на рис. б) к водам 2 типа. Как

правило, воды 1 типа условно можно отнести к прозрачным малопродуктивным, второго – мутным высокопродуктивным.

В результате выделили 6 основных кластеров, средние СКСЯ которых представлены на рисунке. Дополнительное деление СКСЯ по форме на рис в) и г) также возможно, но имеет уже другой физический смысл. Можно показать, что изменение формы СКСЯ связано, в основном, с изменением концентраций ОАК, что видно по их форме, представленной на рис в) и г).

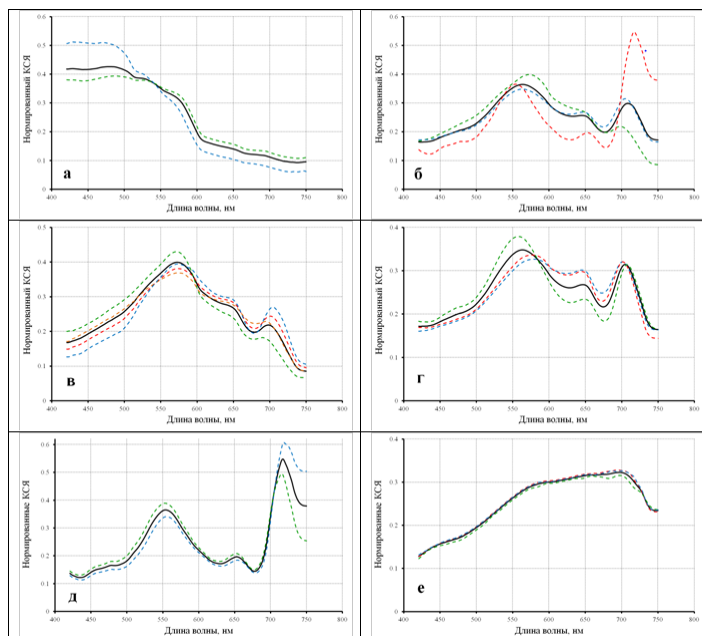


Рис – Типичные средние СКСЯ поверхностных водных объектов: а) ультраолиготрофного (оз. Байкал) б) общий для всех объектов Юга РФ; в) эвтрофных с преобладанием диатомовых и динофлагелятов; г) эвтрофных с преобладанием синезеленых; д) гиперэвтрофного; е) гипермутного

Полученное деление СКСЯ по форме на типы и классы оказывается необходимым при интерпретации спутниковой спектральной информации и позволяет проводить однозначный качественный контроль СКСЯ пикселей, необходимый при дешифрировании этой информации. При формальном использовании алгоритмов интерпретации могут получаться ошибочные результаты, которых можно было бы избежать при указанном контроле.

Такое деление СКСЯ по форме позволяет предложить критерии деления по оптическим (видимым) показателям представленные в таблице. Кроме того, в этой же таблице приведены средние значения концентраций ОАК характерные для каждого класса СКСЯ.

Таблица – Оптические критерии разделения СКСЯ по форме

Обозначение типа СКСЯ	$C_{chl\ a}$, мкг/дм ³	C_{oc2} , мкг/дм ³	Категории трофности	Критерии типа СКСЯ
Тип 1	—	—	—	$\rho_{<600} \gg \rho_{>600}$
Тип 2	3-1500	10-350	1-6	$\rho_{<600} \approx \rho_{>600}$
2НД	3-55	10-50	1-4	$\rho_{625} > \rho_{650}$
2НСз	13-143	10-30	3-5	$\rho_{625} \leq \rho_{650}$
2ГЭ	60-1500	5-50	6	$\rho_{700} \gg \rho_{560}$
2ГМ	—	90-350	—	$\rho_{450} < \rho_{560} < \rho_{625} < \rho_{675} < \rho_{700}$

На третьем этапе рассмотрен экологический смысл полученного результата формальной кластеризации СКСЯ.

Во-первых, СКСЯ это оптический образ водного объекта в видимом диапазоне длин волн. Известно, что этот образ (изображение) формируется излучением, выходящим из фотического слоя воды, а точнее, водной экосистемы. В этом слое происходит большинство процессов, отвечающих за биологическую жизнь на Земле. Восходящее от воды излучение в той или иной степени несет информацию обо всех основных процессах, происходящих в экосистеме. Иными словами, о состоянии экосистемы, так как состояние системы определяется всей совокупностью внутриводоемных процессов: химических и биологических. Соответственно и восходящее от воды излучение подвержено влиянию (определяется) всех внутриводоемных процессов и зависит от взаимодействия всех компонентов и оптически активных, и неактивных, через оптически активные. В результате мы можем интерпретировать изменение формы СКСЯ как отражение изменения состояния водной экосистемы. Безусловно, для полной интерпретации необходимо учитывать изменения во всем оптическом диапазоне спектра от ультрафиолетового до инфракрасного, но мы считаем, что основные процессы в водной экосистеме происходят именно в видимой области спектра и по форме СКСЯ в этой области представим интерпретацию полученных результатов, условно считая результаты такой интерпретации оценкой состояния водных экосистем по дистанционной спектрометрической информации.

Используя изображение водного объекта, полученное одновременно во многих спектральных диапазонах и понимая физический смысл варажения (1), мы считаем, что СКСЯ представляют собой образ (отображение) именно СВЭ. Если СКСЯ, соответствующие типам, приведенным на рис а) и б), представляют собой именно обобщенные типы вод, то остальные типы (рис в) - е)) представляют собой характеристики состояния водных экосистем. Эти состояния достаточно понятны для экологов и их легко можно представить в виде формальных обозначений (см. таблицу).

Состояния соответствующие предельным, аномальным, представлены на рис д) и е). Это гиперэвтрофное (ГТ) и гипермутное (ГМ) состояния. В таких экосистемах нарушен световой режим. Свет не проникает в толщу воды либо за счет покрытия водного объекта ковром их живых и отмерших клеток планктона – состояние ГТ, либо за счет его отражения от частиц взвешенных (в основном, минеральных) веществ – состояние ГМ. Состояние же водной экосистемы, представленное на рис в) и г) относятся к «нормальному» (2Н), незначительные изменения концентраций ОАК естественны для нормально функционирующей экосистемы и характерны для ее сезонных изменений либо за счет температуры окружающей среды, либо за счет изменения гидрологического режима водоема (водотока) и сезонных изменений видового состава фитопланктона.

Однако, как уже отмечалось, эти состояния можно дополнительно охарактеризовать изменяющейся мутностью (М) и трофностью (Т). Мутность изменяется от 1 до 3, трофность – от 1 до 5. Тогда состояния нормального функционирования экосистемы примут обозначения 2Н.СЗ (М_і,Т_ј) и 2Н.Д (М_і,Т_ј).

Таким образом, в результате проведенного анализа многолетней дистанционной спектрометрической информации высокого спектрального разрешения предложена оптическая классификация состояния водных экосистем. В работе рассмотрены экспериментальные данные для пресноводных водных объектов 2 типа, расположенных на Юге России. Отсутствуют данные, полученные для водных объектов при чрезвычайных ситуациях. Крайне мало данных по водным объектам 1 типа.