

В.А. Матюшенко, В.Н. Пелевин, В.В. Ростовцева

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЯРКОСТИ МОРЯ ТРЕХКАНАЛЬНЫМ СПЕКТРОФОТОМЕТРОМ С БОРТА НИС

Дано описание трехканального спектрофотометра, предназначенного для определения коэффициента спектральной яркости (КСЯ) моря путем одновременной регистрации яркости восходящего от моря излучения, яркости сопряженного участка неба и освещенности поверхности моря. Приведены наиболее характерные результаты измерений в различных акваториях Средиземного и Черного морей. Проведено исследование погрешности определения КСЯ по этой методике и показано, что наибольшее влияние на ее величину в условиях проведения этой серии измерений имел линзовый эффект. Общая погрешность измерений КСЯ не превышала 6–7%.

Измерение коэффициента спектральной яркости (КСЯ) моря [1] с борта движущегося судна является необходимой процедурой при проведении подспутниковых наблюдений с целью отработки методов оперативного мониторинга различных акваторий Мирового океана.

Отработка методики таких измерений проводилась в 53-м рейсе НИС «Академик Курчатов» (1994 г.), где был использован трехканальный спектрофотометр, выполненный на основе [2]. Спектрофотометр построен по схеме прямого отсчета и предназначен для регистрации спектральной плотности яркости вышедшего из моря плюс отраженного от его поверхности солнечного излучения (B_m), яркости излучения сопряженного участка неба (B_n) и освещенности (облученности) поверхности моря (E_0) в спектральном диапазоне 400–700 нм с разрешающей способностью по спектру 2,5 нм.

Коэффициент яркости моря рассчитывался через регистрируемые спектрофотометром величины по формуле

$$\rho_\lambda = [K_1 (B_m - K_2 B_n)] / K_3 E_0, \quad (1)$$

где K_1 – коэффициент, учитывающий неидеальность рассеивающей солнечное излучение поверхности белого горизонтально расположенного над водной поверхностью отражателя (пеннопласта); K_2 – коэффициент отражения Френеля; $K_3 = B_n/E_0$ – калибровочный коэффициент, учитывающий переход от регистрируемой спектрофотометром облученности поверхности моря E_0 к яркости B_n калибровочного пенопластового экрана.

Функциональная оптико-электронная схема трехканального спектрофотометра (измерителя коэффициента спектральной яркости моря) приведена на рис. 1. Оптическая часть этой схемы представляет собой оптическую головку и монохроматор. В оптической головке в отличие от спектрофотометра, описанного в [2], применен модулятор (коммутатор оптических каналов), выполненный в виде зеркала 4, вращающегося со скоростью 9000 об/мин с помощью двигателя 5, и устройства 6, формирующего импульсы синхронизации. Зеркало 4 поочередно направляет на входную щель 10 монохроматора световые потоки, поступающие с трех оптических каналов B_m , B_n и E_0 . Иллюминатор 1, диафрагма 2, нейтральный светофильтр 3 и входная щель 10 монохроматора составляют канал яркости неба B_n ; иллюминатор 8, диафрагма 7 и входная щель 10 монохроматора – канал яркости моря B_m , а световой коллектор 15 освещенности поверхности моря (молочное стекло), нейтральный светофильтр 16, поворотное зеркало 17 и входная щель 10 монохроматора – канал облученности E_0 . В оптической головке спектрофотометра имеется четвертый (темновой) канал, который используется для компенсации фоновой засветки и темнового тока фотоэлектронного умножителя (ФЭУ).

Во время работы модулятора в устройстве 6 формируются импульсы синхронизации в моменты прохождения световых потоков через каналы B_m , B_n и E_0 , а также при сканировании зеркалом 4 темного канала.

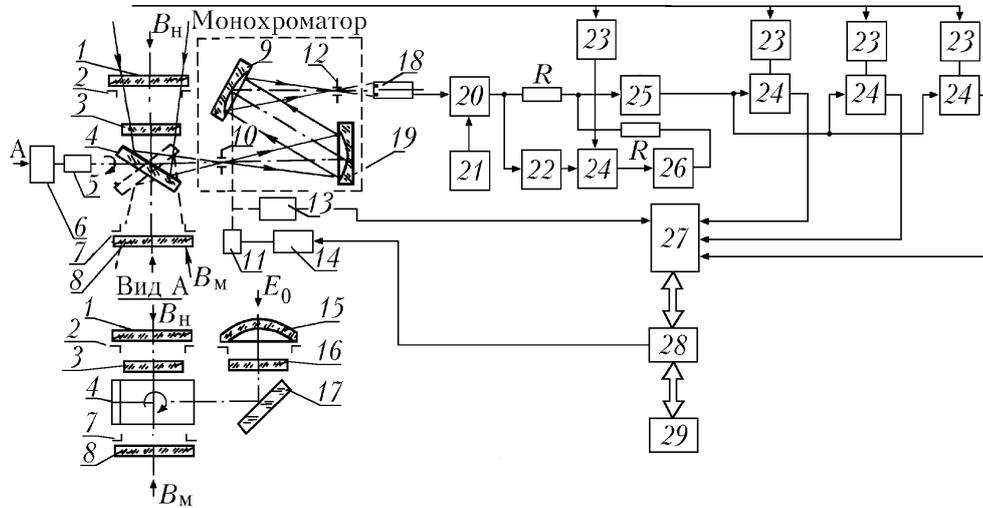


Рис. 1. Функциональная опико-электронная схема измерителя коэффициента спектральной яркости излучения моря

Одновременно с коммутацией оптических каналов осуществляется спектральный анализ световых потоков, причем скорость коммутации настолько высока, что сигналы со всех каналов регистрируются практически на одной длине волны в пределах спектральной разрешающей способности монохроматора. Это позволяет в результате аналоговой обработки регистрируемых сигналов получать на выходе спектрофотометра одновременно электрические сигналы, пропорциональные световым потокам, разложенным во времени по спектру. Такой способ регистрации составляющих компонент вышеуказанной формулы позволяет уменьшить погрешность определения КСЯ, обусловленную изменчивостью метеорологических условий при проведении измерений.

Использованный в спектрофотометре монохроматор [3] выполнен по z -образной схеме Водсворта на вогнутой дифракционной решетке 9 (1200 штр./мм), которая с помощью двигателя 11 и редуктора непрерывно вращается вокруг оси, параллельной штрихам. Входная щель 10, зеркальный объектив 19, дифракционная решетка 9 и выходная щель 12 образуют z -образную схему монохроматора. Режим вращения дифракционной решетки реверсивный. Время прямого и обратного ходов спектральной развертки не превышает одной минуты. Длина волны анализируемого участка спектра пропорциональна углу поворота дифракционной решетки. Электрический сигнал, пропорциональный углу поворота дифракционной решетки, а следовательно, длине волны анализируемого участка спектра, формируется в датчике 13, выполненном на многооборотном проволочном потенциометре типа С1-39, имеющем высокую надежность, которая обеспечивается конструкцией и за счет золотого покрытия нихромовой проволоки. В спектрофотометре предусмотрен режим установки заданной длины волны анализируемого участка спектра путем фиксирования положения дифракционной решетки. Изменение работы спектрофотометра с режима непрерывного спектрального сканирования на режим установки заданной длины волны монохроматора осуществляет устройство 14, которое управляется дистанционно по команде с пульта управления или по программе с ЭВМ.

Регистрируемые световые потоки, поступающие через оптические каналы B_m , B_n , E_0 и разлагаемые монохроматором по спектру, преобразуются фотоэлектронным умножителем 18 типа ФЭУ-68, установленным за выходной щелью 12 монохроматора, в пропорциональные электрические сигналы, которые далее усиливаются согласующим усилителем 20, выполненным на операционном усилителе КР544УД1А. Фотоэлектронный умножитель работает в линейном режиме. Нелинейность рабочей характеристики ФЭУ-68 в диапазоне регистрируемых световых потоков не превышает 0,5%. Это достигается за счет введения нейтральных светофильтров в каналы B_n и E_0 , что снижает максимальный ток ФЭУ-68 до 5 мкА (максимальный

допустимый ток ФЭУ-68 составляет 50 мкА), и за счет относительно большого тока делителя напряжения питания ФЭУ (до 1 мА), который обеспечивался высоковольтным источником напряжения 21 (1200 В). Конструктивно высоковольтный делитель напряжения питания ФЭУ располагался на плате согласующего усилителя 20.

Усиленный сигнал ФЭУ далее подвергается аналоговой обработке, заключающейся в компенсации фоновой засветки ФЭУ и его темнового тока и в распределении импульсных сигналов ФЭУ по электрическим каналам VB_m , VB_n и VE_0 , соответствующим оптическим каналам B_m , B_n и E_0 . Для этого на входе усилителя-инвертора 25 осуществляется сложение сигнала ФЭУ с таким же сигналом, но проинвертированным в усилителе 22 и зафиксированным в момент отсутствия на фотокатоде ФЭУ измеряемых световых потоков по каналам B_m , B_n , и E_0 , т.е. во время сканирования зеркалом 4 темнового канала. Для этого используется запоминающее устройство 24, которое в этот момент открывается соответствующим импульсом синхронизации, поступающим с усилителя-формирователя 23, и запоминает значение сигнала, пропорционального темновому току и фоновой засветке ФЭУ. Далее этот сигнал положительной полярности поступает через повторитель 26 и резистор R на вход усилителя-инвертора 25, где суммируется с сигналом ФЭУ, имеющим отрицательную полярность. В результате из общего сигнала ФЭУ вычитается сигнал, пропорциональный фоновой засветке и темновому току ФЭУ. Следовательно, на выходе усилителя-инвертора 25 присутствуют импульсные сигналы ФЭУ, «привязанные» к нулевому уровню.

Для распределения импульсных сигналов ФЭУ по электрическим каналам используются импульсы синхронизации, которые поступают через усилители-формирователи 23 на управляемые входы запоминающих устройств 24, на сигнальные входы которых поступают усиленные импульсные сигналы ФЭУ. На выходе запоминающих устройств 24 получают постоянные напряжения, пропорциональные световым потокам, поступающим по оптическим каналам B_m , B_n и E_0 , причем эти напряжения в результате «привязки» их к нулевому уровню при отсутствии указанных световых потоков имеют минимальные значения, определяемые шумами ФЭУ и дрейфом (температурным, временным и пр.) операционных усилителей (составная часть запоминающих устройств 24), которые выполняют роль выходных и согласующих устройств.

Таким образом, на выходе спектрофотометра формируются постоянные напряжения, пропорциональные регистрируемому световому потоку. Эти напряжения, а также напряжение, пропорциональное длине волны анализируемого участка спектра, поступают на аналого-цифровой преобразователь 27, который управляется ЭВМ 28 типа IBM PC/AT. По специальной программе на ЭВМ 28 производится вычисление КСЯ моря, значения которых документируются в реальном масштабе времени на регистраторе 29.

Перед выполнением измерений спектрального коэффициента яркости моря в экспедиции производилась градуировка спектральной шкалы прибора с помощью интерференционных светофильтров. В результате градуировки определен спектральный диапазон работы прибора, составляющий интервал длин волн от 400 до 700 нм.

Выполнялась также калибровка каналов яркости моря и яркости неба. Необходимыми условиями корректности измерений являются идентичность этих каналов по оптическим параметрам (выполнено конструктивно) и равенство коэффициентов передачи (усиления) электрических каналов.

Калибровка канала облученности моря осуществлялась следующим образом. Прибор устанавливался над горизонтальным пенопластовым экраном, который освещался Солнцем и на который был направлен канал яркости моря. В этом канале вводился нейтральный светофильтр с известным коэффициентом пропускания. Записывались спектры сигналов B_n и E_0 , и определялся указанный выше коэффициент K_3 .

Оценим погрешность определения КСЯ по этой методике в условиях измерений. Основными составляющими этой погрешности являются: погрешность $\sigma_p^{ан}$, определяемая аппаратурной погрешностью регистрации яркости и освещенности в трех каналах (σ_{B_m} , $\sigma_{K_2 B_n}$, σ_{E_0}); погрешность $\sigma_p^к$, возникающая при оценке коэффициента черноты диффузного отражателя K_1 и передаточного коэффициента K_3 при проведении калибровки; и погрешности $\sigma_p^н$, $\sigma_p^{отр}$ и $\sigma_p^л$, обусловленные неоднородностью яркости отраженного участка небосвода, а также волнением моря. Оценим величину этих составляющих при наших измерениях. Значение $\sigma_p^{ан}$ определяется выражением

$$\sigma_{\rho}^{\text{ан}2} = [K_1/(K_3 E_0)]^2 (\sigma_{B_M}^2 + \sigma_{K_2 B_n}^2) + \rho^2 (\sigma_{E_0}^2/E_0^2). \quad (2)$$

Благодаря конструкции спектрофотометра $\sigma_{B_M} = \sigma_{K_2 B_n} = \sigma_{E_0} = \sigma_B$. Аддитивная составляющая этой погрешности была измерена при полностью закрытых каналах и составила 2,5 мВ. Мультипликативная составляющая погрешности, определяемая нелинейностью преобразования оптико-электронного тракта, составила не более 0,005 в использованном динамическом диапазоне. Значения сигналов изменялись от 0,5 до 5 В. Подставляя эти значения в (2), получим, что аппаратная погрешность не превышает $2 \cdot 10^{-4}$ для малых и $3 \cdot 10^{-4}$ для больших значений КСЯ ($\rho \sim 0,05$).

Калибровочные коэффициенты определялись с погрешностью не более 3% от их величины, и, следовательно, погрешность $\sigma_{\rho}^k < 0,03\rho$, причем эта погрешность является систематической и не влияет на спектральную зависимость КСЯ.

При регистрации сигналов B_M , B_n и E_0 было замечено, что в то время как с двух каналов B_n и E_0 идет, как и следовало ожидать, слабозащумленный сигнал, с канала B_M регистрируется флуктуирующий сигнал со средней амплитудой колебаний 10% от среднего значения. В условиях проведения нами этой серии измерений такие флуктуации сигнала были обусловлены линзовым эффектом на поверхности (эффектом двойной фокусировки) [4]. Действительно, при соблюдении оптимальных условий измерения КСЯ: открытое Солнце (\odot), углы возвышения Солнца $30^\circ \leq h_{\odot} \leq 60^\circ$, отсутствие облачности по крайней мере в телесном угле $\pm 45^\circ$ от зенита, волнение $0 \div 1$ балл, отклонение угла визирования от вертикали до 10° , – влияние неоднородности поля яркости отраженного участка небосвода на величину погрешности определения КСЯ мало. Отличие коэффициента отражения Френеля, реализовавшегося на взволнованной поверхности в этих условиях, от 0,02 также несущественно, следовательно, и погрешность определения КСЯ при расчете доли отраженного излучения в суммарном сигнале много меньше аппаратной ($\sigma_{\rho}^h, \sigma_{\rho}^{\text{оп}} \ll \sigma_{\rho}^{\text{ан}}$). При скорости ветра свыше 4 м/с влияние этих факторов на погрешность определения КСЯ возрастает и может быть учтено в соответствии с данными, приведенными в [5, 6].

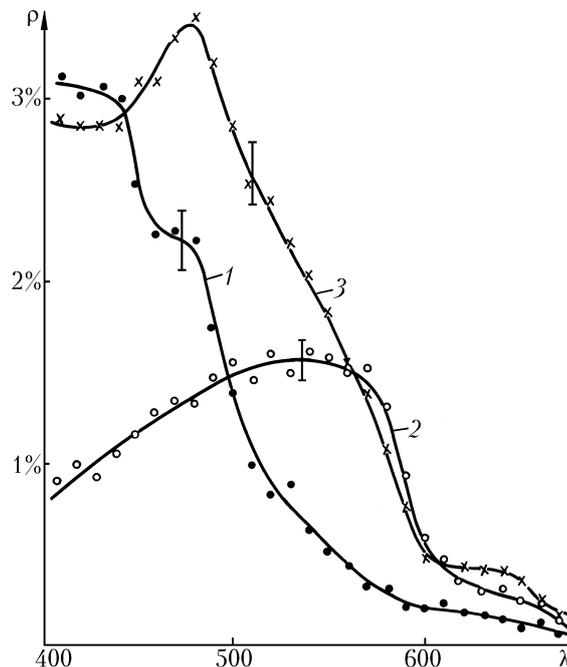


Рис. 2. Спектральные зависимости коэффициента яркости моря, измеренные трехканальным спектрофотометром с борта НИС «Академик Курчатова» (53-й рейс, 1994 г.) в Эгейском (1), Мраморном (2) и Черном (3) морях

Линзовый эффект при измерениях с борта НИС даже при оптимальных условиях наблюдения ярко выражен вследствие небольшой площади поверхности моря, попадающей в поле зрения прибора. Этот эффект вызывает флуктуацию сигнала в канале B_M . Уменьшение влия-

ния линзового эффекта на погрешность определения КСЯ возможно при усреднении нескольких реализаций спектральной зависимости B_m ($\sigma_p^n = \left(\frac{K_1 B_m}{K_3 E_0} \right) \left(\frac{\sigma_{B_m}}{B_m} \right)$). Благодаря этой процедуре относительная погрешность определения КСЯ была снижена до 5%, что, однако, превосходит как калибровочную, так и аппаратную погрешности. Таким образом, суммарная погрешность измерения КСЯ не превышала 6–7%.

Измерения проводились с борта движущегося НИС в Средиземном и Черном морях. Все полученные зависимости могут быть разделены на три типа, наиболее характерные результаты приведены на рис. 2. Прозрачные воды характеризуются зависимостью типа 1 (измерения в Эгейском море). Мутные воды характеризуются зависимостью типа 2 (измерения в Мраморном море). Кроме того, наблюдались зависимости промежуточного типа: прозрачность таких вод понижена, в связи с относительно высокой концентрацией хлорофилла наблюдается максимум значений КСЯ в зеленой области спектра (кривая 3, измерения в Черном море).

Таким образом, измерения с борта движущегося судна трехканальным спектрофотометром дают возможность получения спектрального распределения коэффициента яркости моря с погрешностью, не превышающей 6–7%. Спектральные зависимости коэффициента яркости могут быть использованы для определения типа вод по классификации [7] и для оценки концентрации хлорофилла, взвеси и других компонент морской воды.

1. Оптика океана. Т. 1 / Под ред. А.С. Монина. М.: Наука, 1983. 372 с.
2. Кельбалиханов Б.Ф., Матюшенко В.А. и др. Методика и средства измерения спектрального коэффициента яркости водной среды: Тезисы доклада III Всесоюзной научно-технической конференции «Фотометрия и ее метрологическое обеспечение». М.: ВНИИОФИ, 1979. С. 387.
3. Кельбалиханов Б.Ф., Матюшенко В.А. и др. Монохроматический источник и приемник излучения с перестраиваемой частотой излучения в видимой области спектра: Оптические исследования в океане и атмосфере над океаном. М.: Изд. ИО АН СССР, 1975.
4. Лучинин А.Г., Сержевская И.А. О влиянии поверхностного волнения на цвет моря // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1986. Т. 22. № 3. С. 331–334.
5. Васильков А.П., Кельбалиханов Б.Ф. Дистанционные оптические пассивные методы исследования океана. Сыктывкар: ИЭПС УрО РАН, 1991.
6. Дистанционный контроль верхнего слоя океана / Под ред. М.В. Кабанова. Новосибирск: Наука, 1991. 149 с.
7. Пелевин В.Н. Оптические явления на поверхности океана / А.С. Монин, В.П. Красицкий. Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 375 с.

Институт океанологии РАН,
Москва

Поступила в редакцию
19 июля 1995 г.

V. A. Matyushenko, V. N. Pelevin, V. V. Rostovtseva. **Measurement of Sea Radiance Coefficient by Three-channel Spectrophotometer from Board Ship.**

The description of the three-channel spectrophotometer is given. It is developed for the determination of the spectral sea radiance coefficient by simultaneous registration of the intensity of upward sea radiation, the radiance of an adjoint sky area and the sea surface illumination. The most typical results of the measurements in different aquatoria of Mediterranean and Black seas are shown. The investigation of the accuracy of the sea radiance coefficient determination by this method is carried out. The lense effect is proved to be the main factor affecting the accuracy in this set of experiments, the summary error does not exceed 6–7%.