

УДК 551.463.5

© М. Е. Ли, О. В. Мартынов*, 2022

Морской гидрофизический институт РАН, 299011, ул. Капитанская, д. 2, Севастополь, Россия

*E-mail: oleg.martynov.49@mail.ru

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРОВ ЯРКОСТИ ВОСХОДЯЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ МОРЯ

Статья поступила в редакцию 14.02.2022, после доработки 03.08.2022, принята в печать 12.08.2022

Отмечено, что высокую инструментальную точность современных морских спектрофотометров трудно реализовать из-за больших методических погрешностей, обусловленных волнением на поверхности моря погодными условиями и геометрией освещения. Предложен устраняющий недостатки двухлучевой спектрофотометр на основе использования многоканального фотоумножителя. Описывается конструкция и принцип работы спектрофотометра, разработанного на основе компактного светосильного монохроматора и фотометрического блока, в котором располагаются каналы яркости восходящего излучения и облученности поверхности моря. С целью уменьшения методических погрешностей в приборе вместо абсолютных измерений световых потоков производится их сравнение в дифференциальном фотометре. Применение дифференциального фотометра, измеряющего спектральный коэффициент яркости, позволяет значительно повысить точность измерений, т. к. не требует абсолютной калибровки оптических каналов. Использование многоканального фотоумножителя приводит к дополнительному уменьшению методических погрешностей путем сокращения времени измерений спектрального коэффициента яркости моря, что предоставляет возможность в большом по объему массиве данных выделить достаточное количество спектров без помех от волнения и условий освещения. Оцифровка сигналов фотоумножителя производится с помощью малогабаритного USB-модуля АЦП/ЦАП с функциями цифрового ввода-вывода. На вход модуля поступают усиленные сигналы с фотокатодов, выход модуля посредством стандартного кабеля подключается к USB-входу компьютера, регистрирующего сигналы и управляющего работой спектрофотометра.

Ключевые слова: морской палубный спектрофотометр, инструментальные измерения спектрального коэффициента яркости

© М. Е. Lee, O. V. Martynov*, 2022

Marine Hydrophysical Institute RAS, 299011, Kapitanskaya Str. No. 2, Sevastopol. Russia

*E-mail: oleg.martynov.49@mail.ru

METHOD FOR FAST MEASURING OF SEAWATER-LEAVING RADIANCE SPECTRA

Received 14.02.2022; Revised 03.08.2022; Accepted 12.08.2022

It is noted that the high instrumental accuracy of modern marine spectrophotometers for reflectance measurements is difficult to implement due to large methodological errors caused by the sea surface waves by weather conditions and illumination geometry. A two-beam spectrophotometer based on the use of a multi-channel photomultiplier eliminating the disadvantages is proposed. The design and operation principle of a spectrophotometer, developed on the basis of a compact high-aperture monochromator and a photometric unit, in which the channels of the upwelling radiation and the irradiance of the sea surface are located, are described. In the instrument, instead of absolute measurements, the light fluxes are compared in a differential photometer instead of absolute measurements in order to reduce methodological errors. The use of a differential photometer, which measures the spectral reflectance of water, can significantly increase the measurement accuracy, because does not require absolute calibration of optical channels. The use of a multichannel photomultiplier leads to an additional decrease in methodological errors by reducing the time of measurements of the seawater spectral reflectance and makes it possible to select a sufficient number of spectra in a large volume of data without interference from waves and lighting conditions. The photomultiplier signals are digitized using a compact USB ADC/DAC module with digital input/output functions. Amplified signals from photocathodes are received at the module input, the module output is connected to the USB input of a computer recording signals and controlling the spectrophotometer work.

Keywords: ship-borne multifunctional spectrophotometer, measurements of spectral remote-sensing reflectance

Ссылка для цитирования: Ли М.Е., Мартынов О.В. Быстродействующий метод измерения спектров яркости восходящего излучения моря // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 3. С. 43–52.

doi:10.48612/fpg/afm7-vh6d-r4a4

For citation: Lee M.E., Martynov O.V. Method for Fast Measuring of Seawater-Leaving Radiance Spectra. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15, 3, 43–52. doi:10.48612/fpg/afm7-vh6d-r4a4

1. Введение

Спектрофотометры для измерений спектральных особенностей коэффициента яркости моря являются одними из основных гидрооптических приборов при проведении океанологических подспутниковых экспериментов для опорной калибровки космических сканеров цвета моря [1–3]. Основным назначением этих спектрофотометров является проведение полевых измерений спектральных характеристик восходящего из моря излучения при исследованиях связи этих характеристик с концентрацией в морской воде пигментов фитопланктона, растворенного органического вещества и других оптически активных примесей. Эти исследования весьма важны для верификации данных космических сканеров цвета океана. Поэтому появляется все больше работ, посвященных методике измерения коэффициента яркости, приборам для этих измерений и определению биооптических параметров вод по результатам измерений коэффициента яркости.

В экспедиционных условиях коэффициент яркости можно определять различными способами. Одним из широко распространенных на первоначальном этапе исследований был способ определения с помощью измерителя яркости. При этом процесс измерений проходил в три этапа: сначала производилось измерение яркости горизонтально расположенного эталонного диффузно рассеивающего экрана, затем измеряли яркость водной толщи. Для исключения отраженной составляющей от поверхности моря при дистанционных измерениях необходимо проводить также измерения яркости неба в соответствующем направлении.

В ряде исследований определение коэффициента яркости производилось по результатам одновременных измерений двух или даже трех датчиков: измерителя падающей облученности, измерителя яркости восходящего излучения и измерителя яркости сопряженного участка небосвода [4–13]. Однако такие способы измерений предъявляют очень высокие требования к точности, долговременной стабильности и линейности характеристик датчиков. В случае измерений, проведенных одним прибором, измерения разделены по времени, и это обстоятельство накладывает дополнительные ограничения на постоянство погодных условий. При определениях тремя разными датчиками небольшие погрешности каждого из измерителей могут привести к недопустимым результирующим ошибкам.

2. Постановка задачи

Реализация новой концепции подспутникового обеспечения космических сканеров цвета нового поколения [14], которые обладают более высокой точностью измерения световых потоков, лучшим пространственным разрешением и большим количеством спектральных каналов, потребовала дальнейшего развития неконтактных методов оперативной оценки значений коэффициента яркости поверхностных вод с борта судна.

Особенно тщательно исследовались возможности минимизации помех от взволнованной поверхности моря в зависимости от погодных условий и геометрии освещения. Связано это с тем, что высокую инструментальную точность современных спектрофотометров для измерений световых потоков в море часто оказывалось трудно реализовать из-за несоизмеримо больших методических погрешностей. Помимо отражения различных участков неба от взволнованной поверхности моря сказываются также флуктуации подводного светового поля из-за фокусировки лучей, при прохождении света через взволнованную поверхность и пульсаций геометрического пути светового пучка за счет колебаний уровня. Пульсации геометрического пути лучей вызывают флуктуации характеристик светового поля во всей толще фотического слоя моря, тогда как линзовые эффекты, напротив, сказываются лишь у самой поверхности. Наиболее важным является то, что во всей толще моря, за исключением самого приповерхностного слоя, спектр флуктуаций облученности и спектр колебаний возвышений практически совпадают, а степень когерентности на низких частотах между ними приближается к единице.

В случае измерений с борта судна, коэффициент яркости моря выражается через измеряемые световые потоки формулой [15]:

$$R_{rs} = \frac{n^2}{T_1 T_2} \cdot \frac{L_u - r_f L_{sk}}{E_d}, \quad (1)$$

где n — показатель преломления света водой; $r_f = 0,02$ — френелевский коэффициент отражения при нормальном падении; T_1 — коэффициент пропускания границей раздела воздух-вода; T_2 — коэффициент пропускания границей раздела вода-воздух, диффузно отраженного толщей моря излучения в зенит; L_u — восходящая яркость моря; L_{sk} — яркость области небосвода в зените; E_d — облученность поверхности моря. Формула (1) справедлива только для случая идеального состояния поверхности моря без волнения, полном

отсутствии облачности, при измерении яркости восходящего излучения строго в нади́р. В реальных условиях все перечисленные условия, как правило, не соблюдаются и в результаты измерений морских спектрофотометров привносятся трудно учитываемые помехи, которые вызывают методические погрешности по величине значительно превышающую инструментальную точность. В море структура световых полей характеризуется чрезвычайной сложностью из-за взаимного влияния на распространение света сразу множества факторов: сложных эффектов преломления и отражения света на границе раздела вода-воздух, сильной изменчивости и стратифицированности оптических свойств по глубине. С целью уменьшения методических погрешностей методы традиционных световых измерений в море были пересмотрены и приведены к такому виду, чтобы можно было осуществить переход от абсолютных измерений световых потоков к их сравнению в дифференциальном фотометре. Дополнительно методические погрешности можно устранить путем уменьшения времени измерений спектрального коэффициента яркости моря, таким образом, чтобы в большом по объему массиве данных можно было бы выделить достаточное количество спектров без помех от волнения и условий освещения.

В большинстве случаев время измерений определяется временем сканирования по спектру примененного в спектрофотометре монохроматора. Это время может быть уменьшено во много раз при использовании линейных многоэлементных приемников светового излучения, в качестве которых чаще всего используются полупроводниковые фотоприемники [16]. Недостатком спектрофотометров с такими линейными многоэлементными полупроводниковыми фотоприемниками является то, что они обладают малой чувствительностью и не допускают возможности управлять их чувствительностью и поэтому предназначены для измерений в узком диапазоне изменений измеряемых световых потоков.

Для устранения одного из этих недостатков, а именно недостаточной чувствительности, нами ранее были предложены двухлучевые дифференциальные спектрофотометры на основе использования фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) в качестве светоприемника [17, 18].

Структурная схема электрической части предложенного спектрофотометра приведена на рис. 1.

Основу оптического блока составляет монохроматор, на входной щели которого установлен фотометрический блок, реализующий двулучевой принцип измерения. Блок осуществляет попеременное направление световых потоков пропорциональных восходящей яркости моря и нисходящей облученности на входную щель монохроматора. При вращении obtюратора на фотокатод ФЭУ поочередно попадают два световых потока, пропорциональных облученности поверхности E_d и яркости восходящего излучения моря L_u . Для выработки импульсов распознавания этих сигналов в механизме obtюратора смонтирована оптопара, срабатывание которой происходит строго синхронно с прохождением шторки модулятора между ними. Оптическая схема настроена таким образом, что значения фототоков, обусловленные световыми потоками в каждый

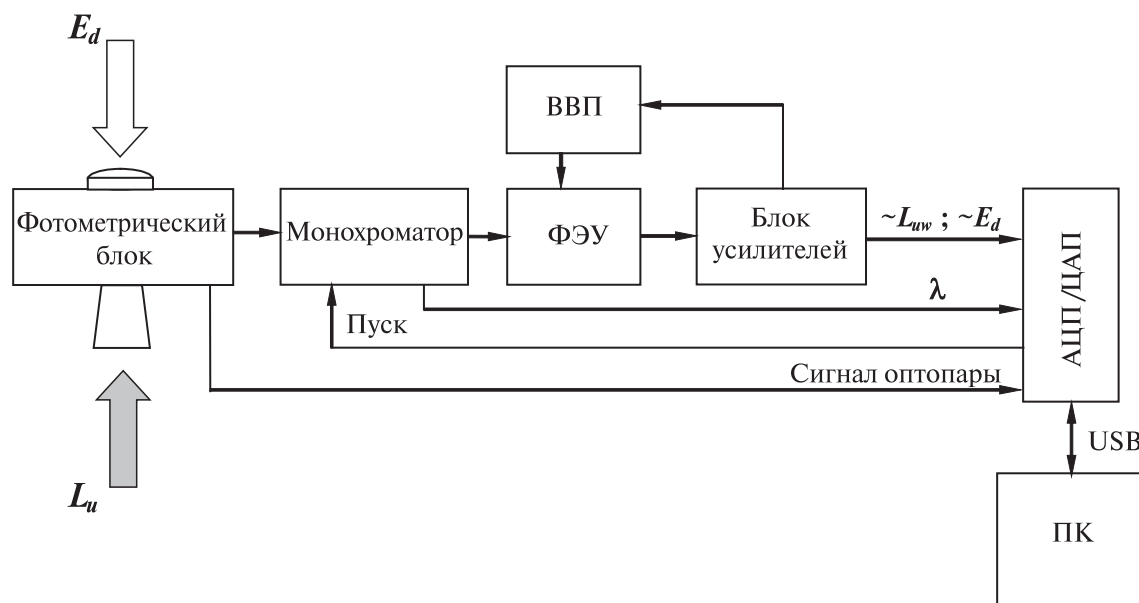


Рис. 1. Структурная схема электрической части спектрофотометра

Fig. 1. Structural diagram of the electrical part of the spectrophotometer

момент времени, имеют один порядок по величине. Через монохроматор потоки яркости и облученности поочередно попадают на фотокатод ФЭУ. В блоке усилителей производится усиление сигналов ФЭУ, а также в нем вырабатывается напряжение, управляющее работой высоковольтного преобразователя ФЭУ (ВВП). Для поддержания выходного тока ФЭУ в рабочем диапазоне его чувствительность необходимо регулировать. Наиболее простым и эффективным способом регулировки чувствительности фотоумножителя является изменение напряжения высоковольтного источника питания. В результате чувствительность фотометра непрерывно подстраивается под абсолютную величину падающего в воду солнечного излучения путем автоматического поддержания среднего выходного тока ФЭУ на заданном оптимальном уровне. Калибровка прибора проводится с помощью белого диффузно отражающего экрана с известным коэффициентом яркости.

Следует отметить, что формула (1) верна для проведения измерений с борта в направлении близком к надиру. Однако при такой постановке эксперимента велико влияние затенения корпусом прибора, и, чтобы избежать этого, измерения проводятся под углом свыше 15° к надиру. При этом уже нельзя точно учесть коэффициент френелевского отражения, так как он зависит от состояния небосвода и морской поверхности, а также геометрии наблюдений, и, кроме того, меняется с длиной волны. Для использования данного спектрофотометра предусмотрена методика измерений, состоящая в следующем. После измерения коэффициента яркости поверхности моря ρ_{sea} (рис. 2, а) в поле зрения объектива спектрофотометра устанавливалась заполненная водой кювета с поглощающими стенками и дном для измерения в условиях той же освещенности коэффициента яркости только водной поверхности ρ_{surf} (рис. 2, б). Спектры коэффициента яркости водной поверхности ρ_{surf} далее вычитаются из спектров общего коэффициента яркости моря. Таким образом, определялся коэффициент яркости толщи вод моря ρ_w :

$$\rho_w = \rho_{sea} - \rho_{surf} \quad (2)$$

В дальнейшем величина ρ_w будет называться для краткости коэффициентом яркости моря.

Несмотря на то, что процедура измерений несколько усложняется, такой метод позволяет учесть отраженную составляющую. Применение указанной процедуры позволило получать хорошие результаты [19]. Разница в состоянии взволнованной поверхности в море и в кювете выражается в большем разбросе данных измерений коэффициента яркости моря ρ_{sea} , которая нейтрализуется отбраковкой выбросов и осреднением нескольких последовательных измерений.

Эти универсальные спектрофотометры для измерений коэффициента яркости моря позволили решать разнообразные подспутниковые задачи оптико-биологического направления. За счет применения ФЭУ удалось добиться не только существенного увеличения чувствительности, но и путем ее автоматической подстройки под изменяющиеся условия освещения непрерывно подбирать оптимальный режим в процессе измерений. Это позволило проводить измерения спектрального коэффициента яркости моря с очень высокой инструментальной точностью, но из-за длительного времени измерений не удавалось избавиться от проблем методических погрешностей вследствие засветки отраженной волнующейся морской поверхностью сопряженных участков небосвода и части бликовой составляющей. Таким образом, основным не-

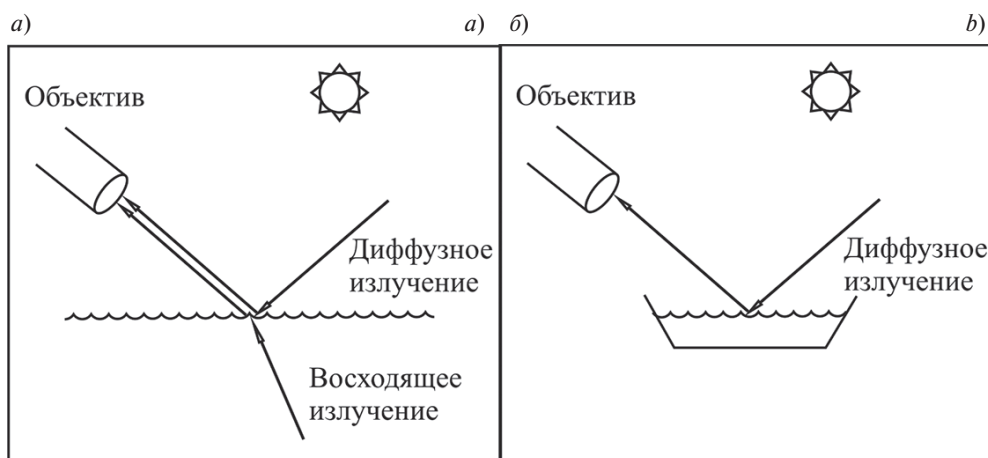


Рис. 2. Схема измерений коэффициента яркости моря

Fig. 2. Sea reflectance measurement scheme

достатком этих приборов являлось то, что измерения проводились длительное время, поэтому требуемая для подспутниковых целей точность измерений могла быть достигнута только в ясную погоду, когда волнение моря небольшое, а условия освещения достаточно стабильны. При большем волнении, а особенно при наличии мелкой ряби, помехи от солнечных бликов и из-за отражений от взволнованной поверхности моря различных участков небосвода, становятся настолько большими, что их не удается пока полностью устранить простой отбраковкой выбросов и специальными процедурами сглаживания.

Поэтому актуальной задачей является разработка чувствительного дифференциального спектрофотометра, не требующего абсолютной калибровки оптических каналов и с небольшим временем измерений. Это позволит за непродолжительное время получить достаточное количество спектров коэффициента яркости, которое предоставит возможность провести отбраковку помех от солнечных бликов.

3. Разработка спектрофотометра с многоканальным фотоэлектронным умножителем

В данной работе предлагается аналогичный двухлучевой спектрофотометр, но уже с многоканальным фотоэлектронным умножителем (32 фотокатода) в качестве приемника светового излучения. В результате удалось сохранить все преимущества описанного выше метода измерений, но при этом существенно сократить время необходимое для получения спектральных характеристик восходящего из моря излучения. Разработанный нами морской многофункциональный спектрофотометр состоит из фотометрического блока, устанавливаемого на входной щели компактного монохроматора ML44 [20] и блока многоканальной регистрации спектров на его выходе (рис. 3).

Компактный светосильный короткофокусный монохроматор ML44, обеспечивает работу в спектральном диапазоне 190–1200 нм. Отличительной особенностью монохроматора ML44 является использование высококачественных объективов-ахроматов вместо обычно применяемой в таких приборах зеркальной оптики. За счет этого в монохроматоре ML44 удалось добиться большей светосилы и минимума рассеянного света при исключительной компактности по сравнению с другими приборами своего класса. Обратная линейная дисперсия монохроматора ML44 (среднее значение), составляет 18,7 нм/мм для решетки с количеством 1200 штрихов и 34,7 нм/мм соответственно для 600 штрихов на мм. Такие значения обратной линейной дисперсии хорошо согласуются с входным окном многоканального фотоэлектронного умножителя фирмы Hamamatsu, смонтированного таким образом, чтобы входное окно располагалось в плоскости выходного спектра монохроматора.

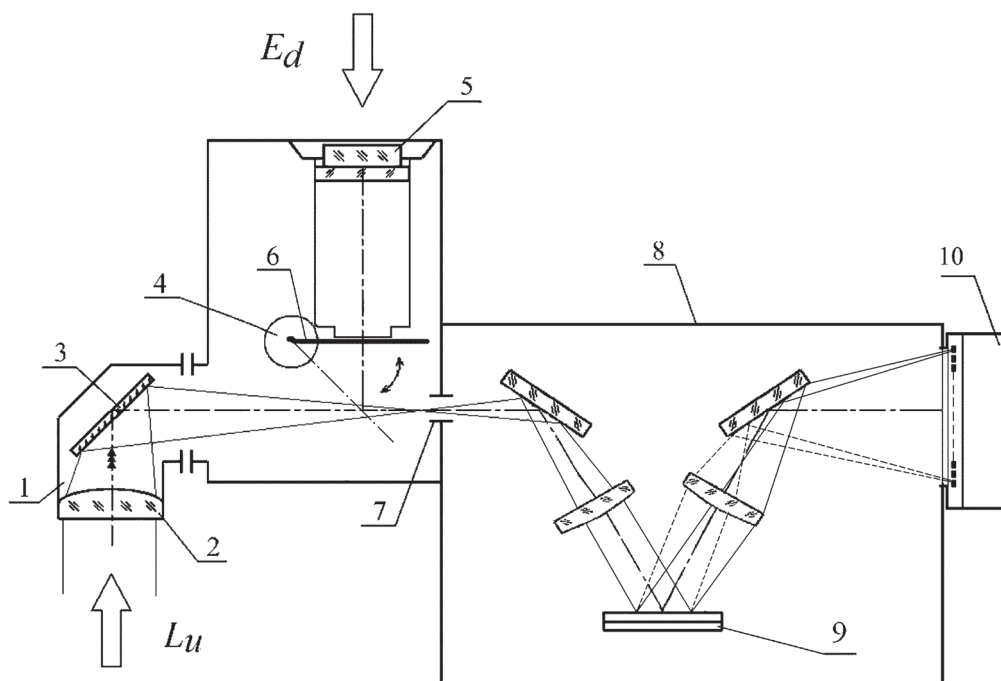


Рис. 3. Оптическая блок-схема морского спектрофотометра

Fig. 3. Optical block diagram of a marine spectrophotometer

Фотометрический блок представляет собой устройство, в котором формируются оба луча морского спектрофотометра. Эти лучи с помощью управляемого поворотным соленоидом 4 (BOS10/15 фирмы Такано [21]) отражателя 6 попеременно направляются внутрь монохроматора 8 через его входную щель 7 и фокусируются на дифракционной решетке 9, которая обеспечивает дифракционную картину на фотокатодах ФЭУ 10. Один из лучей формируется каналом яркости восходящего излучения, а другой — соответственно облученности поверхности моря. Для повышения точности измерений светосила каналов подобрана таким образом, чтобы соответствующие электрические сигналы были одного порядка по амплитуде. Канал яркости фотометрического блока (рис. 3) выполнен в виде оптической головки 1, составленной из объектива 2 и зеркала 3, отклоняющего луч на 90° . Оптическая головка 1 выполнена так, что может поворачиваться вокруг горизонтальной оси от надира до зенита и тем самым обеспечивает возможность измерения суммарной яркости восходящего из моря излучения и небосвода по всем направлениям. Это дает возможность каждый раз подбирать оптимальные направления измерений, при которых помехи от волнения, состояния небосвода и условий освещения будут минимальными. При этом сам спектрофотометр фиксируется так, чтобы световой коллектор канала облученности поверхности моря находился в горизонтальном положении, тогда как яркость восходящего излучения может измеряться под углом, который обеспечивает минимальный уровень помех. Измерения проводятся при волнении 1–3 балла и минимальной качке судна.

Канал облученности выполнен в виде цилиндрической насадки с косинусным коллектором 5, изготовленным из молочного стекла МС-13. Цилиндрическая насадка является также светозащитным экраном, предотвращающим попадание света из одного канала в другой.

Блок многоканальной регистрации спектров 10 включает в себя многоканальный фотоэлектронный умножитель Н7260 (32 фотокатода), с делителем и источником высокого напряжения фирмы Hamamatsu [22] и фотоэлектрическую схему усиления и преобразования сигналов с ФЭУ.

Эскиз внешнего вида многоканального ФЭУ с указанием его габаритов и размеров светочувствительных площадок приведен на рис. 4 слева, а справа их спектральные характеристики для катодной чувствительности и квантовой эффективности.

Технические характеристики фотоприемного устройства Н7260, представленные в описании [22], полностью отвечают требованиям к морскому спектрофотометру для измерений спектральных характеристик восходящего из моря излучения, а его конструкция позволяет легко состыковывать с монохроматором.

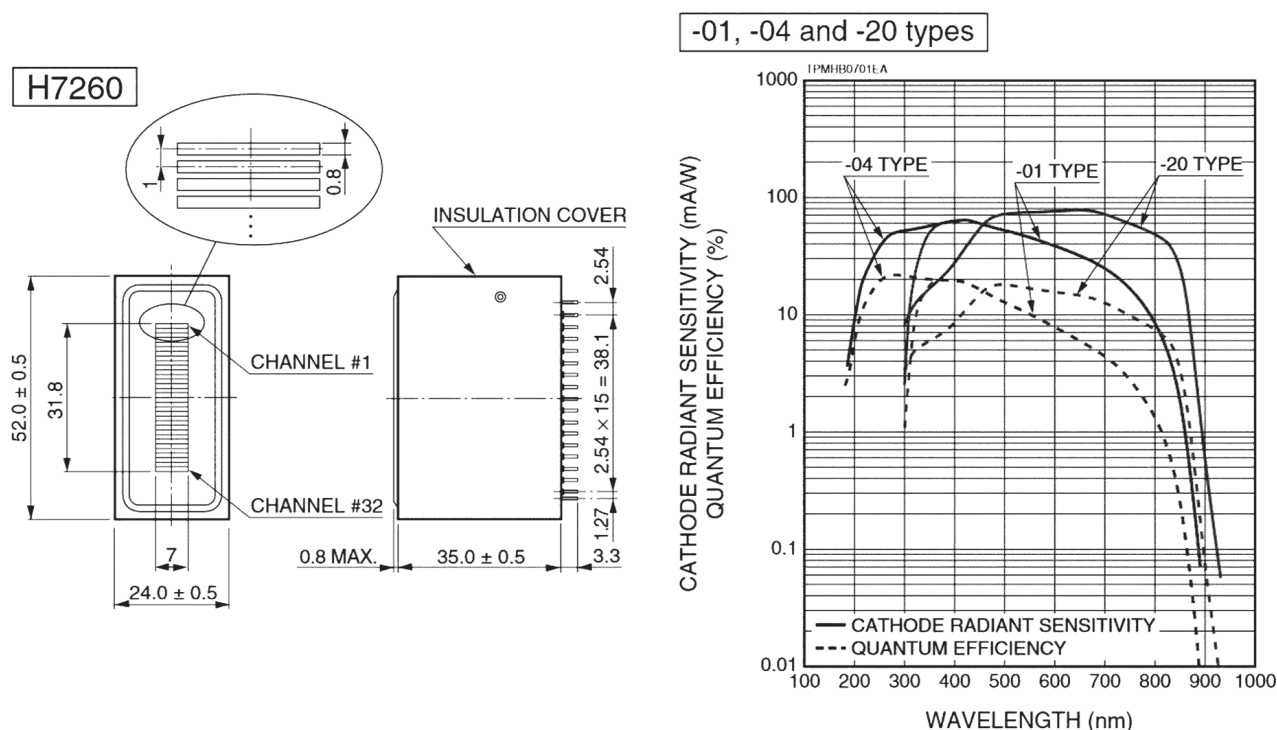


Рис. 4. Многоканальный фотоэлектронный умножитель Н7260–01 фирмы Hamamatsu [21]

Fig. 4. Multichannel photomultiplier H7260–01, Hamamatsu Photonics Co. [21]

В данном спектрофотометре монохроматор ML44 используется в качестве полихроматора. Размеры щелей в монохроматоре установлены такими, чтобы на линейку фотокатодов ФЭУ попадал спектр в диапазоне 400–720 нм, следовательно, разрешение по спектру оптики прибора составляет около 10 нм.

Функциональная электрическая схема блока управления спектрофотометром и многоканальной регистрации спектров представлена на рис. 5. Сигналы анодов ФЭУ преобразуются в напряжения 32-мя усилителями $U1—U32$ и подаются на входы внешнего устройства аналогово-цифрового преобразования (АЦП) ЛА-20USB производства ЗАО «Руднев-Шиляев» [23]. Устройство ЛА-20USB предназначено для работы с персональным компьютером. Основное назначение ЛА-20USB — преобразование аналоговых сигналов в цифровую форму и передача их в ПЭВМ. Оно также может передавать и принимать цифровые сигналы. С помощью специальной программы ПЭВМ осуществляет контроль над работой спектрофотометра и регистрацию результатов измерений.

Цикл измерения восходящей яркости моря состоит в следующем:

1. Установка отражателя 6 (рис. 3) в положение, при котором на входную щель монохроматора попадает луч, соответствующий облученности поверхности моря и одновременное подключение сигнала, получаемого с 16 анода ФЭУ к блоку управления высоковольтным преобразователем (ВВП).
2. Регулировка чувствительности ФЭУ по сигналу 16 канала (16-й фотокатод расположен в зоне близкой к максимуму спектра солнечного излучения).
3. Регистрация спектра облученности.
4. Установка отражателя 6 (рис. 3) в положение, при котором на входную щель монохроматора попадает луч, соответствующий яркости восходящего излучения. При этом 16-й канал отключается от блока управления ВВП, но чувствительность, установленная в ходе регулировки ФЭУ, остается.
5. Регистрация 10-ти спектров восходящей яркости.

С учетом задержек, обусловленных временем регулировки чувствительности, оцифровкой каналов, переключением соленоида заслонки лучей, а также задержек программного обеспечения цикл измерения составляет примерно 0,5–1 с.

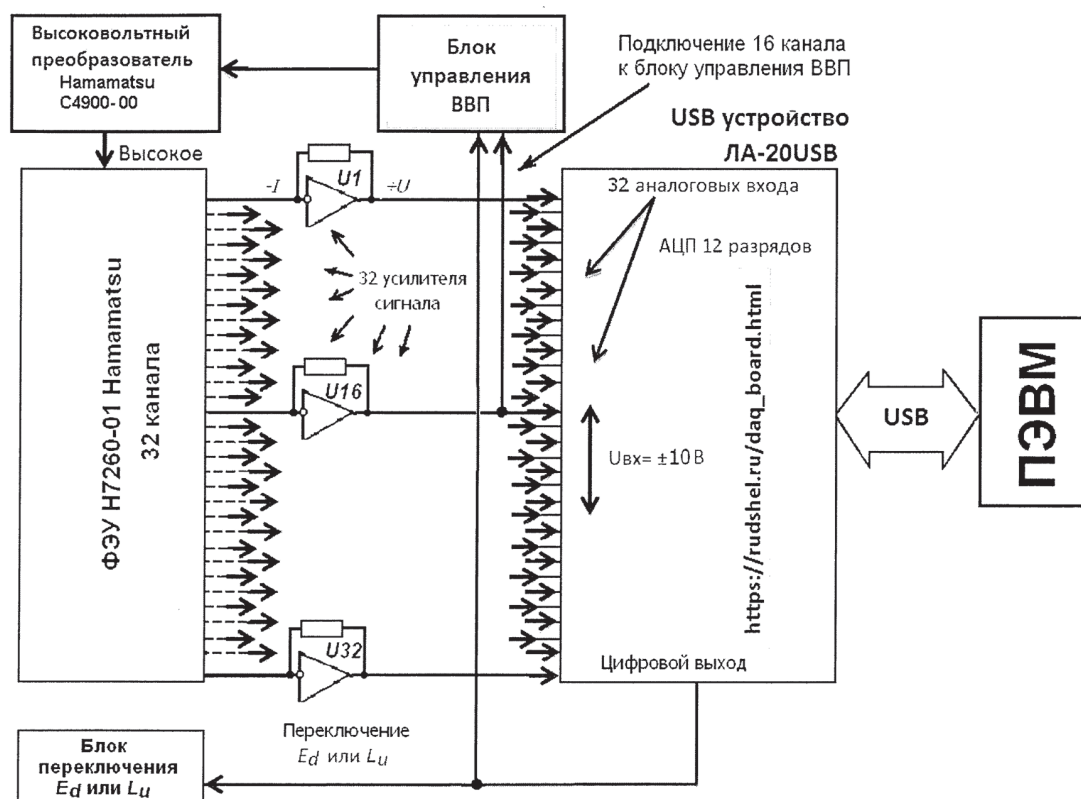


Рис. 5. Функциональная электрическая схема блока управления спектрофотометром и многоканальной регистрации спектров

Fig. 5. Functional electrical diagram of the unit for the spectrophotometer control and spectra multichannel recording

Таким образом, за относительно короткое время, можно получить значительное количество спектров, провести их разбраковку и выделить достаточное количество спектров без помех от волнения и условий освещения.

4. Заключение

Рассмотрены спектрофотометры, для измерений спектральных особенностей коэффициента яркости моря. Указывается, что для этих приборов ранее были тщательно исследованы возможности минимизации помех от взволнованной поверхности моря в зависимости от погодных условий и геометрии освещения. Отмечено, что высокую инструментальную точность современных спектрофотометров для измерений световых потоков в море часто невозможно реализовать из-за несоизмеримо больших методических погрешностей. Устранение этих методических погрешностей предложено осуществлять за счет существенного уменьшения времени измерений спектров яркости восходящего излучения. Предложен двухлучевой спектрофотометр на основе использования многоканального фотоумножителя устраняющий перечисленные недостатки.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Тема 0555-2021-0003 «Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений» (шифр «Оперативная океанология»).

Funding

The work was carried out within the framework of the State task Theme 0555–2021–0003 “Development of methods of operational oceanology based on interdisciplinary studies of the processes of formation and evolution of the marine environment and mathematical modeling using data from remote and contact measurements” (code “Operational Oceanology”).

Литература

1. Weeks A.R., Robinson I.S., Booty B. A towed near-surface optical reflectance meter for measuring ocean colour in support SeaWiFS // European workshop on optical ground truth instrumentation for the validation of space-borne optical remote sensing data of the marine environment. NIOZ-Rapport, 1993. P. 3–9.
2. Корчёмкина Е.Н. Использование данных об изменчивости оптических свойств атмосферного аэрозоля для коррекции спектров коэффициента яркости моря // Морской гидрофизический журнал. 2012. № 1. С. 39–45.
3. Шибанов Е.Б., Корчёмкина Е.Н. Восстановление биооптических характеристик вод Черного моря при условии постоянства коэффициента яркости на длине волны 400 нм // Морской гидрофизический журнал. 2008. № 1. С. 38–50.
4. Пелевин В.Н., Локк Я.Ф., Кельбалиханов Б.Ф. Фотометр для измерения спектральной яркости выходящего из моря излучения и результаты его испытаний в натурных условиях // Оптические исследования в океане и атмосфере над океаном. М.: Изд. ИОАН, 1975. С. 126–134.
5. Morel A. In-water and remote measurements of ocean color // Boundary-Layer Meteorology. 1980. Vol. 18, N 2. P. 177–201. doi:10.1007/BF00121323
6. Матюшенко В.А., Пелевин В.Н., Ростовцева В.В. Измерение коэффициента яркости моря трехканальным спектрофотометром с борта НИС // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9, № 5. С. 664–669.
7. Toole D.A., Siegel D.A., Menzies D.W., Neumann M.J. and Smith R.C. Remote-sensing reflectance determinations in the coastal ocean environment: impact of instrumental characteristics and environmental variability // Applied Optics. 2000. Vol. 39, N 3. P. 456–469. doi:10.1364/AO.39.000456
8. Hooker S.B., Lazin G., Zibordi G., McLean S.D. An evaluation of above- and in-water methods for determining water-leaving radiances // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2002. Vol. 19, N 4. P. 486–515. doi:10.1175/1520-0426(2002)019<0486: AEOAAI>2.0.CO;2
9. Khrapko A.N., Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Grigoriev A.V., Terekhova A.A. New instrument for measuring surface and underwater irradiances // Proceedings of IV International Conf. “Current problems in optics of natural waters”. Nizhny Novgorod, 2007. P. 271–275.
10. Ростовцева В.В., Коновалов Б.В., Гончаренко И.В., Хлебников Д.В. Способ оценки содержания примесей в морских водах с помощью оперативной спектрофотометрии // Океанология. 2017. Т. 57, № 4. С. 560–574. doi:10.7868/S0030157417040050

11. Ruddick K., De Cauwer V., Park Y., Moore G. Seaborne measurements of near infrared water-leaving reflectance — the similarity spectrum for turbid waters // *Limnology and Oceanography*. 2006. Vol. 51, N 2. P. 1167–1179. doi:10.4319/lo.2006.51.2.1167
12. Brando V.E., Lovell J.L., King E.A., Boadle D., Scott R., Schroeder T. The potential of autonomous ship-borne hyper-spectral radiometers for the validation of ocean color radiometry data // *Remote Sensing*. 2016. Vol. 8, N 2: 150. P. 1–18. doi:10.3390/rs8020150
13. Гончаренко И.В., Ростовцева В.В., Коновалов Б.В. Использование нового судового комплекса пассивного оптического зондирования для получения распределения естественных примесей в прибрежных водах // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. Т. 11, № 3. С. 97–101. doi:10.3390/rs8020150
14. Groom S., Sathyendranath S., Ban Y., Bernard S., Brewin R., Brotas V., Brockmann C., Chauhan P., Choi J.-k., Chuprin A., Ciavatta S., Cipollini P., Donlon C., Franz B., He X., Hirata T., Jackson T., Kampel M., Krasemann H., Lavender S., Pardo-Martinez S., Mélin F., Platt T., Santoleri R., Skakala J., Schaeffer B., Smith M., Steinmetz F., Valente A., Wang M. Satellite Ocean Colour: Current status and future perspective // *Frontiers in Marine Science*. 2019. 6:485. doi:10.3389/fmars.2019.00485
15. Lee M.E., Shybanov E.B., Korchemkina E.N., Martynov O.V. Determination of the concentration of components in the seawater under upwelling radiation brightness spectrum // *Physical Oceanography*. 2015. N 6. P. 15–30. doi:10.22449/1573-160X-2015-6-15-30
16. Molkov A.A., Fedorov S.V., Pelevin V.V., Korchemkina E.N. Regional models for high-resolution retrieval of chlorophyll *a* and TSM concentrations in the Gorky Reservoir by Sentinel-2 Imagery // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11, N 10: 1215. doi:10.3390/rs11101215
17. Ли М.Е., Мартынов О.В. Измеритель коэффициента яркости для подспутниковых измерений биооптических параметров вод // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2000. С. 163–173.
18. Lee M.Y.G., Fedorov S.V. Double beam spectrophotometer for simultaneous measurement of the upwelling sea radiance and the incident sea irradiance // *Light and Engineering*. 2019. Vol. 27, N 3. P. 105–110. doi:10.33383/2018-001
19. Каралли П.Г., Копелевич О.В., Салинг И.В., Шеберстов С.В., Паутова Л.А., Силкин В.А. Валидация дистанционных оценок параметров кокколитофоридных цветений в Баренцевом море по данным натурных измерений // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. Т. 11, № 3. С. 55–63. doi:10.7868/S2073667318030073
20. Светосильный короткофокусный монохроматор ML44: [Электронный ресурс] URL: <http://www.solarspectral.com/catalog/42/232/> (дата обращения: 11.01.21).
21. Двухпозиционный поворотный соленоид BOS10/15 фирмы Takano: [Электронный ресурс] URL: <https://www.takano-sanki21.com/sanki/en/products/optical-shutter/BOS10/15/> (дата обращения: 10.01.20).
22. Linear multianode PMT assemblies and modules: [Электронный ресурс] URL: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/LINEAR_PMT_TPMH1325E.pdf (дата обращения: 01.02.21).
23. ЛА-20USB. Описание: [Электронный ресурс]. URL: <https://rudshel.ru/show.php?dev=34> (дата обращения: 11.02.21).

References

1. Weeks A.R., Robinson I.S., Booty B. A towed near-surface optical reflectance meter for measuring ocean colour in support SeaWiFS. *European workshop on optical ground truth instrumentation for the validation of space-borne optical remote sensing data of the marine environment*. NIOZ-Rapport, 1993, 3–9.
2. Korchemkina E.N. Using data on the variability of the optical properties of atmospheric aerosol to correct the spectra of the sea radiance coefficient. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*. 2012, 1, 39–45 (in Russian).
3. Shybanov E.B., Korchemkina E.N. Recovery of the bio-optical characteristics of the Black Sea waters under the condition of a constant radiance coefficient at a wavelength of 400 nm. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*. 2008, 1, P. 38–50 (in Russian).
4. Pelevin V.N., Lokk Ya.F., Kel'balikhanov B.F. Photometer for measuring the spectral brightness of radiation emerging from the sea and the results of its tests in natural conditions / *Optical research in the ocean and atmosphere over the ocean*. M., Publ. H. IOAN, 1975, 126–134 (in Russian).
5. Morel A. In-water and remote measurements of ocean color. *Boundary-Layer Meteorology*. 1980, 18, 2, 177–201. doi: 10.1007/BF00121323
6. Matyushenko V.A., Pelevin V.N., Rostovtseva V.V. Measurement of the sea reflectance with a three-channel spectrophotometer from the R/V board. *Optika Atmosfery i Okeana*. 1996, 9, 5, 664–669 (in Russian).
7. Toole D.A., Siegel D.A., Menzies D.W., Neumann M.J., Smith R.C. Remote-sensing reflectance determinations in the coastal ocean environment: impact of instrumental characteristics and environmental variability. *Applied Optics*. 2000, 39, 3, 456–469. doi:10.1364/AO.39.000456
8. Hooker S.B., Lazin G., Zibordi G., McLean S.D. An evaluation of above- and in-water methods for determining water-leaving radiances. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2002, 19, 4, 486–515. doi:10.1175/1520-0426(2002)019<0486: AEOAAI>2.0.CO;2

9. Khrapko A.N., Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Grigoriev A.V., Terekhova A.A. New instrument for measuring surface and underwater irradiances // Proceedings of IV International Conf. "Current problems in optics of natural waters". Nizhny Novgorod, 2007, 271–275.
10. Rostovtseva V.V., Konovalov B.V., Goncharenko I.V., Khlebnikov D.V. Method for estimating admixture content in seawater using operative spectrophotometry. *Oceanology*. 2017, 57, 4, 505–519 (in Russian). doi:10.1134/S0001437017040166
11. Ruddick K., De Cauwer V., Park Y., Moore G. Seaborne measurements of near infrared water-leaving reflectance — the similarity spectrum for turbid waters. *Limnology and Oceanography*. 2006, 51, 2, 1167–1179. doi:10.4319/lo.2006.51.2.1167
12. Brando V.E., Lovell J.L., King E.A., Boadle D., Scott R., Schroeder T. The potential of autonomous ship-borne hyperspectral radiometers for the validation of ocean color radiometry data. *Remote Sensing*. 2016, 8, 2, 150, 1–18. doi:10.3390/rs8020150
13. Goncharenko I.V., Rostovtseva V.V., Konovalov B.V. Using of new shipborne complex for passive optical remote sensing for obtaining distribution of natural admixtures in coastal waters. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2018, 11, 3, 97–101 (in Russian). doi:10.7868/S20736673180300127
14. Groom S., Sathyendranath S., Ban Y., Bernard S., Brewin R., Brotas V., Brockmann C., Chauhan P., Choi J.-k., Chuprin A., Ciavatta S., Cipollini P., Donlon C., Franz B., He X., Hirata T., Jackson T., Kampel M., Krasemann H., Lavelle S., Pardo-Martinez S., Mélin F., Platt T., Santoleri R., Skakala J., Schaeffer B., Smith M., Steinmetz F., Valente A., Wang M. Satellite Ocean Colour: Current status and future perspective. *Frontiers in Marine Science*. 2019, 6:485. doi:10.3389/fmars.2019.00485
15. Lee M.E., Shybanov E.B., Korchemkina E.N., Martynov O.V. Determination of the concentration of seawater components based on upwelling radiation spectrum. *Physical Oceanography*. 2015, 6, 15–30. doi:10.22449/1573-160X-2015-6-15-30
16. Molkov A.A., Fedorov S.V., Pelevin V.V., Korchemkina E.N. Regional models for high-resolution retrieval of chlorophyll *a* and TSM concentrations in the Gorky Reservoir by Sentinel-2 Imagery. *Remote Sensing*. 2019, 11(10), 1215. doi.org/10.3390/rs11101215
17. Lee M.E., Martynov O.V. Reflectance meter for sub-satellite measurements of bio-optical parameters of waters. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources*. 2000, 163–173 (in Russian).
18. Lee M.Y.G., Fedorov S.V. Double beam spectrophotometer for simultaneous measurement of the upwelling sea radiance and the incident sea irradiance. *Light and Engineering*. 2019, 27, 3, 105–110. doi:10.33383/2018-001
19. Karalli P.G., Kopelevich O.V., Sahling I.V., Sheberstov S.V., Pautova L.A., Silkin V.A. Validation of remote sensing estimates of coccolitophore bloom parameters in the Barents Sea from field measurements. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2018, 11, 3, 55–63 (in Russian). doi:10.7868/S2073667318030073
20. High-aperture short-focus monochromator ML44: [Electronic resource] URL: <http://www.solarspectral.com/catalog/42/232/> (Access date: 11.01.21) (in Russian).
21. Bi-Stable Optical Shutter BOS10/15, Takano Co., LTD: [Electronic resource] URL: <https://www.takano-sanki21.com/sanki/en/products/optical-shutter/BOS10/15/> (Access date: 10.01.20).
22. Linear multianode PMT assemblies and modules: [Electronic resource] URL: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/LINEAR_PMT_TPMH1325E.pdf (Access date: 01.02.21).
23. LA-20USB. Device description: [Electronic resource] URL: <https://rudshel.ru/show.php?dev=34>, (Access date: 11.02.21) (in Russian).

Об авторах

ЛИ Михаил Ен Гон

Доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом оптики и биофизики моря, главный научный сотрудник отдела оптики и биофизики моря, Морской гидрофизический институт РАН (299011, ул. Капитанская, д. 2, г. Севастополь, Россия), ROR 05961na22

Scopus Author ID: 56142710400,
elibrary AuthorID: 865650
e-mail: michael.lee.mhi@gmail.com

МАРТЫНОВ Олег Викторович

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела оптики и биофизики моря, Морской гидрофизический институт РАН (299011, ул. Капитанская, д. 2, г. Севастополь, Россия), ROR 05961na22

Scopus Author ID: 57201603369,
elibrary AuthorID: 854852,
e-mail: ovmartynov@gmail.com