

УДК 551.463.5

©М.Е. Ли, С.В. Фёдоров

Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь
michael.lee.mhi@gmail.com, s.fedorov@mhi-ras.ru

КОМПЕНСАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ИСКЛЮЧЕНИЮ МЕТОДИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ МОРСКОЙ ВОДЫ

Статья поступила в редакцию 02.08.2019, после доработки 18.10.2019

Предлагается компенсационный подход, направленный на исключение методических погрешностей при измерениях спектрального показателя ослабления света в морской воде, и описывается схема прозрачномера, в котором реализован данный подход. Особенность предлагаемой оптической схемы состоит в том, что измерительный и опорный лучи формируются идентичными оптическими элементами, составляющими опорный и измерительный каналы, при этом оба канала выведены в измеряемую среду. В такой оптической схеме отпадает необходимость введения поправки на изменение коэффициента отражения поверхностей оптических деталей, соприкасающихся с морской водой, при погружении прибора в море, или проведения сложной калибровки с использованием особо чистой воды. В результате появляется возможность использования калибровки прибора на воздухе для определения показателя ослабления непосредственно в измеряемой среде после погружения прибора в воду. Т.к. измерения фактически выполняются на двух оптических базах, может быть выполнена самокалибровка прибора без использования аттестованной эталонной воды с известными оптическими характеристиками. В качестве источника светового излучения применен мощный многоэлементный семицветный светодиод.

Ключевые слова: прозрачность, прозрачномер, спектральный показатель ослабления света.

M.E. Lee, S.V. Fedorov

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

COMPENSATORY APPROACH TO EXCLUDE METHODOLOGICAL ERRORS IN MEASUREMENTS OF SPECTRAL TRANSPARENCY OF SEAWATER

Received 02.08.2019, in final form 18.10.2019

A compensatory approach aimed at eliminating methodological errors in the measurements of the beam attenuation coefficient in seawater is proposed and the scheme of the transmissometer in which this approach is implemented is described. The special feature of the proposed optical scheme is that the measuring and reference beams are formed by identical optical elements that make up the reference and measuring channels, while both channels are transmitted to the measured medium. Since the measurement and reference channels are identical and both are transmitted in the measured environment, there is no need to correct changes of reflectance on optical parts when the device is immersed in sea water. There is also no need for complex calibration using pure water. As a result, it is possible to use the instrument calibration in air to determine the beam attenuation coefficient after immersion of the instrument in water. Since the measurements are actually performed on two optical bases, self-calibration of the device can be performed without the usage of pure water with known optical characteristics. A powerful multi-element seven-color LED is used as a light source.

Key words: beam transmittance, transmissometer, spectral beam attenuation coefficient.

1. Введение

В течение многих лет прозрачность поверхностных вод оценивалась по глубине видимости белого диска. Несмотря на чрезвычайную простоту этих измерений, они имеют ограниченное применение в силу субъективности в оценке результатов из-за сильной зависимости от остроты зрения и навыков

Ссылка для цитирования: Ли М.Е., Фёдоров С.В. Компенсационный подход к исключению методических погрешностей при измерениях спектральной прозрачности морской воды // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2019. Т. 12, № 4. С. 78–84.

For citation: Lee M.E., Fedorov S.V. Compensatory approach to exclude methodological errors in measurements of spectral transparency of seawater. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2019, 12, 4, 78–84.

DOI: 10.7868/S2073667319040099

конкретного наблюдателя. Кроме того, оценка прозрачности морской воды по глубине видимости белого диска совершенно не применима в случаях, когда важно знать данные о распределении этой характеристики по глубине. В качестве параметра, более объективно характеризующего меру ослабления света, удобно использовать показатель ослабления направленного излучения (прозрачность) морской воды $c(\lambda)$. Для измерения этого параметра создано множество конструкций прозрачномеров, в которых реализованы различные виды оптических и фотоэлектрических схем.

На начальном этапе прозрачномеры разрабатывались по простейшей схеме фотометров прямого отсчета. В настоящее время, в основном, применяется схема двухлучевого фотометра, в котором сигнал от ослабленного измеряемой средой света нормируется на сигнал непосредственно от источника света [1–7]. При этом используются две основные концепции оптических схем: с одиночным и двойным прохождением пучка света через измеряемый объем жидкости [1, 2]. В прозрачномерах первого вида источник и приемник излучения расположены соосно на противоположных частях прибора. В этом случае ослабление света происходит на оптической базе в направлении приемника [3, 4]. В конструкциях второго вида источник и приемник излучения размещены в одной части прибора, их оптические оси перпендикулярны друг к другу, а в противоположной части находится отражатель. Таким образом, световой пучок ослабляется, проходя среду в двух направлениях: от источника излучения до отражателя и обратно [5–7]. Последнее решение позволяет увеличить расстояние, вдоль которого производится ослабление пучка света, без увеличения оптической базы прибора.

Несмотря на кажущуюся простоту оптических схем прозрачномеров, сложность их реализации связана с необходимостью обеспечения высокой точности измерений показателя ослабления света, которая определяется, в основном, нестабильностью элементов фотоэлектрической схемы и такими геометрическими параметрами, как угол расходимости источника света, угол фотоприемника и длина оптической базы. Погрешность из-за нестабильности элементов фотоэлектрической схемы сравнительно легко уменьшается выбором соответствующего способа фотоэлектрической регистрации. Остальные факторы по-разному влияют на точность измерений показателя ослабления излучения в природных водах различной мутности и требуют в каждом конкретном случае подбора оптимальных условий.

Другой проблемой, влияющей на точность измерений, являются методические ошибки, связанные с калибровкой прозрачномеров. Традиционно выполняемая в отечественной практике калибровка на воздухе по эталонным нейтральным светофильтрам с известной оптической плотностью приводит к существенной методической погрешности, т.к. при погружении прозрачномера из воздуха в воду происходит изменение пропускания и отражения на поверхностях оптических деталей, соприкасающихся с морской водой. В разное время решить эту проблему пытались введением поправки, которая рассчитывалась теоретическим путем для каждой конкретной оптической схемы отдельно [4]. Ввиду того, что величина поправки значительно превышает значение показателя ослабления чистой воды, неточность ее определения зачастую является основной причиной неоправданно высокой аддитивной составляющей методической погрешности.

Во избежание таких методических ошибок современный протокол Международной координационной группы по цвету океана (IOCCG) и NASA [1, 2] рекомендует производить калибровку прозрачномеров, применяемых для задач океанографии, в особо чистой воде, показатели поглощения $a_w(\lambda)$ и рассеяния $b_w(\lambda)$ которой должны соответствовать известным значениям [8, 9]. К сожалению, такая особо чистая вода не может храниться длительное время и ее нужно приготавливать для калибровки каждый раз заново на уникальных фильтровальных установках сверхтонкой очистки воды. Приготовление чистой воды, не содержащей взвешенных частиц и растворенной органики, – крайне сложный процесс, требующий дорогостоящей уникальной аппаратуры и высококвалифицированного обслуживания. В связи с этим использование этого метода калибровки затруднено для полевых приборов и является главной причиной, почему до сих пор не удается достичь высокой точности при рутинных полевых измерениях показателя ослабления направленного света.

В связи с выше сказанным для целей оптической океанографии особый интерес представляет создание методики измерения спектрального показателя ослабления морской воды, которая, с одной стороны, обладала бы высокой устойчивостью к воздействию дестабилизирующих факторов, а с дру-

гой — обеспечивала стабильность калибровочных характеристик как на воздухе, так и в воде. В настоящей работе предлагается возможный вариант решения указанной задачи.

2. Схема и принцип действия прозрачномера

Обычно для уменьшения габаритов прозрачномера опорный канал размещают внутри водонепроницаемого корпуса, а измерительный канал выводят в воду. Таким образом, при калибровке на воздухе оба канала имеют одинаковый коэффициент отражения на оптических деталях, а при погружении в воду — различный, что является основной причиной изменения калибровочных характеристик. Кроме того, вследствие конструктивного отличия измерительный и опорный каналы будут иметь различные коэффициенты пропускания, что также является источником неопределенности. Возможный подход к исключению этих источников методических ошибок — выполнение обоих каналов из идентичных оптических деталей и выведение каналов в измеряемую среду.

В 1980-х годах такое решение было реализовано в прозрачномере «Катран» [10, 11], использовавшимся Институтом океанологии им. П.П. Ширшова РАН в экспедиционных исследованиях. В этом приборе была использована достаточно сложная оптическая схема с большим количеством оптических элементов. Вследствие этого, вероятно, не удалось достичь полной идентичности опорного и измерительного каналов, т. к. для устранения методической погрешности при переходе прибора из воздуха в воду и градуировки в абсолютных значениях показателя ослабления, предлагается производить перемещение отражающей призмы опорного канала для установки «нуля» прозрачномера [11].

Прозрачномер, предлагаемый в настоящей работе, также имеет два канала, выведенных в воду, но за счет уменьшения оптических деталей удается сделать каналы практически идентичными, что позволяет избавиться от необходимости введения дополнительных теоретических поправок для учета изменения коэффициента отражения при калибровке прибора на воздухе. Поскольку при погружении в воду изменение коэффициента отражения на оптических деталях обоих каналов будет идентичным, то при нормировке сигналов от этих каналов калибровочная характеристика, выполненная на воздухе, останется неизменной. Кроме того, такая схема, по сути, позволяет производить измерения ослабления направленного света на двух оптических базах и, следовательно, реализует схему прозрачномера с самокалибровкой [1, 2].

В качестве отражающего элемента в предлагаемом прозрачномере используется трипель-призма. Т.к. ход лучей при различных ориентациях призмы относительно оси измерительного пучка света не меняется, это позволяет плавно изменять длину оптической базы прозрачномера простым перемещением призмы вдоль оси пучка без нарушения юстировки прибора. Следовательно, появляется возможность практически неограниченно расширять диапазон измерения показателя ослабления излучения, поскольку даже в сильно отличающихся по своим оптическим свойствам средах удается производить их в оптимальных условиях с одинаковой относительной погрешностью.

Принцип действия прибора для одновременного измерения в семи спектральных каналах иллюстрирует функциональная схема, приведенная на рис. 1.

Пучок света от светодиода, ограниченный выходной диафрагмой, разделяется прозрачной светоделительной пластиной по двум направлениям — измерительному и опорному. Для идентичности каналов в качестве светоделительной применена пластина из сапфира, которая имеет очень малое поглощение и достаточное отражение в спектральном диапазоне 300—1200 нм. Прошедший через светоделительную пластину измерительный свет коллимируется объективом-иллюминатором и в виде параллельного пучка выходит в измеряемую среду. Далее свет проходит в измеряемой среде расстояние L_u до трипель-призмы и, отразившись от нее, по тому же пути возвращается назад, а затем через тот же объектив-иллюминатор входит внутрь герметичного контейнера. Диаметр выходной ограничивающей диафрагмы подбирается из такого расчета, чтобы диаметр параллельного пучка при выходе из герметичного контейнера был бы меньше диаметра объектива-иллюминатора на величину чуть большей расходимости этого пучка на длине максимальной оптической базы прибора. Соблюдение этого условия очень важно для обеспечения возможности изменения оптической базы, чтобы измерения показателя ослабления направленного излучения в большом диапазоне изменений оптических свойств морской воды всегда происходили в условиях, когда на длине ослабления происходило бы только однократное рассеяние. Ослабленный в морской воде на длине оптической базы свет после

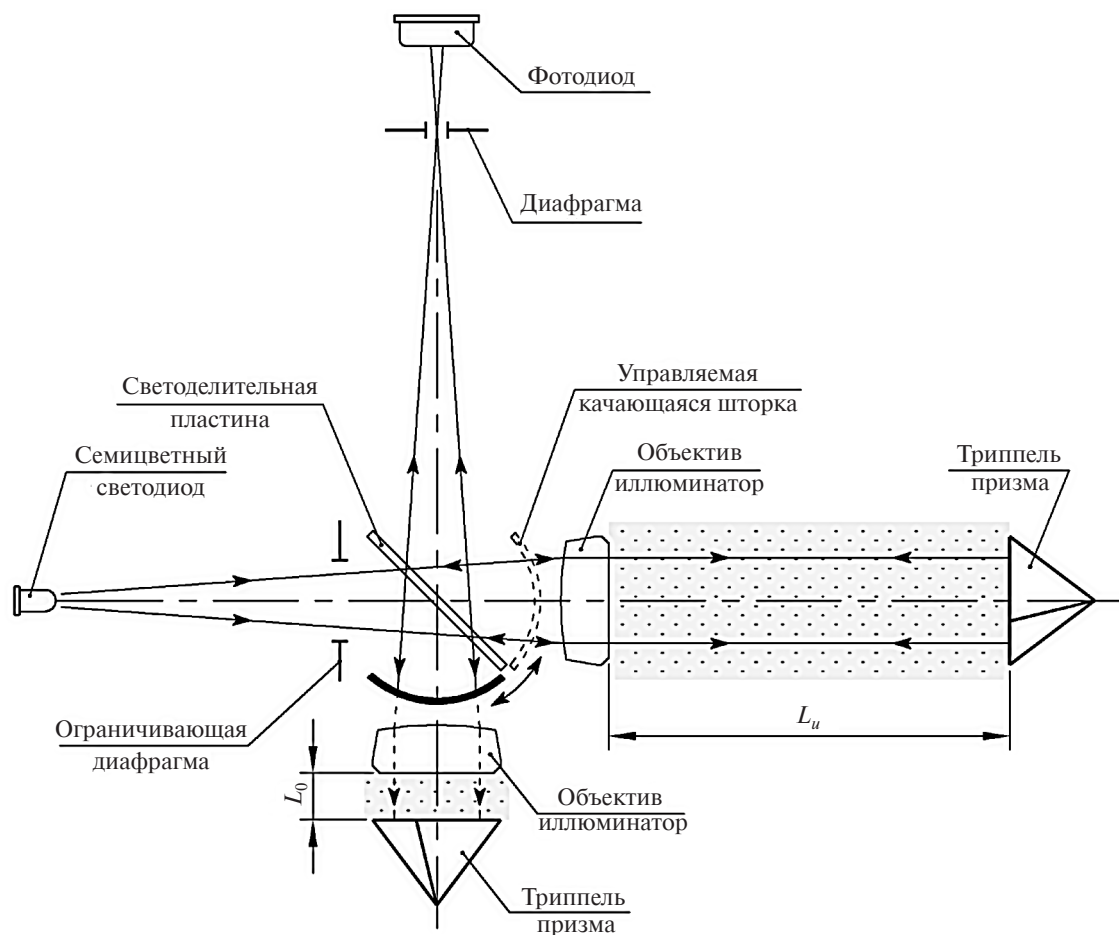


Рис. 1. Функциональная схема спектрального измерителя прозрачности морской воды.

Fig. 1. Functional scheme of the spectral meter of sea water transparency.

прохождения объектива-иллюминатора отражается от светоделительной пластины и направляется в центр измерительной диафрагмы, задающей угол поля зрения приемника, в качестве которого используется кремниевый фотодиод.

Опорный луч формируется из той части света от светодиода, которая, после прохождения выходной диафрагмы, отражается светоделительной пластиной в направлении перпендикулярном измерительному лучу. Опорный канал идентичен измерительному, но со значительно меньшей длиной L_0 прохождения луча в среде. Перед объективами-иллюминаторами, на пути измерительного и опорного световых лучей, помещен оптический прерыватель в виде подвижной шторки, совершающий поступательно-возвратные вращательные повороты на 90° , в результате чего эти лучи попеременно попадают на светочувствительную площадку кремниевого фотодиода, реализуя таким образом схему двухлучевого фотометра с одним светоприемником.

При работе прибора на выходе фотодиода формируется выходной сигнал в виде непрерывной последовательности импульсов напряжения, пропорциональных интенсивностям света соответственно в опорном и в каждом спектральном канале. Далее сигналы усиливаются и через аналого-цифровой преобразователь поступают на соответствующие входы многоканального интерфейса персонального компьютера. На соответствующий вход многоканального интерфейса поступают и данные о глубине погружения прозрачномера с прецизионного датчика давления на основе сапфира. Дальнейшая обработка сигналов до получения физических величин осуществляется программным путем. Программы составлены таким образом, что позволяют производить аналого-цифровые преобразования с сигналом почти одновременно с первичной обработкой данных и вычислением текущих значений показателя ослабления.

В виду идентичности каналов измерения фактически выполняются на двух оптических базах, поэтому получение абсолютных значений показателей ослабления может быть легко получено без

использования аттестованных светофильтров с заданной оптической плотностью следующим образом. Коэффициенты пропускания при измерениях на двух оптических базах измерительного L_1 и опорного каналов L_2 будут иметь вид:

$$T_1(\lambda, L_1) = \frac{\Phi_T(\lambda, L_1)}{\Phi_0(\lambda)} = C_{T1} \frac{U_1(\lambda, L_1) - U_{dark}(\lambda)}{\Phi_0(\lambda)}, \quad (1)$$

$$T_2(\lambda, L_2) = \frac{\Phi_T(\lambda, L_2)}{\Phi_0(\lambda)} = C_{T2} \frac{U_2(\lambda, L_2) - U_{dark}(\lambda)}{\Phi_0(\lambda)}, \quad (2)$$

где $\Phi_T(\lambda, L_1)$ и $\Phi_T(\lambda, L_2)$ – потоки света, ослабленные при прохождении через слой воды толщиной L_1 и L_2 измерительного и опорного каналов соответственно; $\Phi_0(\lambda)$ – поток света, вошедший в воду; C_{T1} , C_{T2} – калибровочные коэффициенты, учитывающие чувствительность фотодиода и потери на оптических деталях измерительного и опорного каналов; $U_1(\lambda, L_1)$ и $U_2(\lambda, L_2)$ – выходные сигналы измерительного и опорного каналов; $U_{dark}(\lambda)$ – сигнал фоновой засветки.

Вследствие того, что оба канала идентичны и выведены в воду $C_T = C_{T1} = C_{T2}$. Поделив выражение (1) на (2), в соответствии с законом Бугера получим простое выражение для расчета показателя ослабления направленного света в зависимости от выходных сигналов, измеренных на двух базах:

$$c(\lambda, L_2 - L_1) = \frac{1}{L_2 - L_1} \ln \left(\frac{U_1(\lambda, L_1) - U_{dark}(\lambda)}{U_2(\lambda, L_2) - U_{dark}(\lambda)} \right). \quad (3)$$

Еще одним преимуществом автоколлимационной схемы прозрачномера с трипель-призмой в качестве отражающего элемента является то, что она практически не реагирует на незначительные уводы лучей при соприкосновении с измеряемой средой, а также на различные деформации оптических деталей и механических конструкций, составляющих оптическую базу прибора. Благодаря этому, исключается возможность разбюстировки прибора в процессе эксплуатации, что имеет большое значение для измерений в морских условиях, особенно на больших глубинах, где велико давление воды.

В качестве источника светового излучения применен мощный многоэлементный семицветный светодиод, имеющий настолько большой срок службы, что позволяет использовать его на протяжении всего времени эксплуатации прозрачномера (рис. 2, см. вклейку). Это имеет большое значение для полевых приборов, поскольку позволяет избавиться от проблем, связанных с заменой вышедшего из строя источника света и последующего проведения трудоемкой юстировки оптической схемы.

Преимуществом светодиода перед использовавшимися ранее галогенными лампами накаливания также является то, что они имеют на несколько порядков более высокую светимость в коротковолновой области спектра и поэтому очень хорошо сочетаются с кремниевыми фотодиодами, которые имеют в этой области минимальную чувствительность. Малые размеры светящихся элементов позволяют обеспечивать минимальный угол расходимости параллельного пучка света, а компактное размещение светящихся элементов на подложке (рис. 2, б) позволяет проводить измерения прозрачности воды в шести узких спектральных каналах в диапазоне 400–625 нм (фиолетовый – 400 нм, синий – 457 нм, голубой – 500 нм, зеленый – 523 нм, оранжевый – 595 нм, красный – 623 нм), а также в «белом» свете (рис. 2, а) путем их электронного коммутирования. Поскольку время электронного коммутирования значительно меньше механического переключения светофильтров это дает возможность получения практически одновременных измерений по всем спектральным каналам.

3. Заключение

Предложена оптическая схема морского прозрачномера, в которой измерительный и опорный лучи формируются идентичными оптическими элементами, составляющими опорный и измерительный каналы, при этом оба канала выведены в измеряемую среду. При использовании такой схемы калибровочная характеристика, выполненная на воздухе, останется неизменной при погружении прибора в воду. В связи с этим исчезает необходимость введения теоретических поправок, учитывающих

изменение коэффициента отражения поверхностей оптических деталей, а также выполнения сложной и требующей дорогостоящего оборудования калибровки с чистой воде. Поскольку измерения выполняются на двух оптических базах, по сути, в предлагаемом приборе реализована схема прозрачномера с самокалибровкой. Использование трипель-призмы в качестве отражающего элемента позволяет производить измерения на различных длинах оптической базы без нарушения юстировки прибора, что позволит использовать прозрачномер в водах с широким диапазоном изменчивости оптических свойств.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2019-0002 «Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений».

Литература

1. Mueller J.L. et al. *Ocean Optics Protocols For Satellite Ocean Color Sensor Validation. Rev. 4, V. IV: Inherent Optical Properties: Instruments, Characterizations // Field Measurements and Data Analysis Protocols, 2003.*
2. IOCCG Protocol Series (2019). Beam Transmission and Attenuation Coefficients: Instruments, Characterization, Field Measurements and Data Analysis Protocols. Boss, E., Twardowski, M., McKee, D., Cetinić, I. and Slade // W. IOCCG Ocean Optics and Biogeochemistry Protocols for Satellite Ocean Colour Sensor Validation. V. 2.0, edited by A. Neeley and I. Cetinić, IOCCG, Dartmouth, NS, Canada.
3. AC-9 Meter. Protocol Document. URL: <http://www.comm-tec.com/Prods/mfgs/Wetlabs/Manuals/ac-protocol-document.pdf> (дата обращения: 02.08.2019).
4. Маньковский В.И., Пеньков М.Н., Бондаренко А.С. Прозрачномер для морской прибрежной станции // Системы контроля окружающей среды. 2004. С. 37—39.
5. Gamma-2 Abyss Deep-Sea Transmissometer. URL: <https://www.hobilabs.com/cmsitems/attachments/3/Gamma-2%20Abyss%20Manual%20D.pdf> (дата обращения: 02.08.2019).
6. Латушкин А.А., Мартынов О.В. Способ определения спектрального показателя ослабления направленного света в морской воде insitu. Патент РФ 2605640 от 27.12.2016. МПК G01N21/59.
7. Артемьев А.А. и др. Прозрачномер морской воды. Патент РФ 2341786 от 20.12.2008. МПК G01N 21/59.
8. Pegau S., Zaneveld R.V., Mueller J.L. Inherent Optical Property Measurement Concepts: Physical Principles and Instruments, in *Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision 4, Volume IV: Inherent Optical Properties: Instruments, Characterizations, Field Measurements and Data Analysis Protocols, NASA/TM-2003-211621/Rev4-Vol. IV*, edited by J.L. Mueller, G.S. Fargion, and C.R. McClain, p. 1—14, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland. 2003.
9. Twardowski M., Röttgers R., Stramski D. The Absorption Coefficient, in *Inherent Optical Property Measurements and Protocols: Absorption Coefficient*, Neeley, A.R. (ed.), IOCCG Ocean Optics and Biogeochemistry Protocols for Satellite Ocean Colour Sensor Validation, Volume 1.0, p. 1—17, IOCCG, Dartmouth, NS, Canada. 2008.
10. Кельбалиханов Б.Ф., Матюшенко В.А. Спектрофотометр. Патент СССР 1055973 от 23.11.1983. МПК G01J 3/42.
11. Буренков В.И., Кельбалиханов Б.Ф., Копелевич О.В. Методы измерений оптических свойств морской воды // Оптика океана / Под ред. А.С. Моница. Т. 1, гл. 5. С. 117—118. М.: Наука, 1983.
12. LED Engin. LZ7-N4M100-0000 Datasheet. https://eu.mouser.com/datasheet/2/228/5412935-LED_2520Engin_Datasheet_LuxiGen_LZ7-04M100-1531974.pdf (дата обращения: 02.08.2019).

References

1. Mueller J.L. et al. *Ocean Optics Protocols For Satellite Ocean Color Sensor Validation, Rev. 4, V. IV: Inherent Optical Properties: Instruments, Characterizations, Field Measurements and Data Analysis Protocols, 2003.*
2. IOCCG Protocol Series (2019). Beam Transmission and Attenuation Coefficients: Instruments, Characterization, Field Measurements and Data Analysis Protocols. Boss, E., Twardowski, M., McKee, D., Cetinić, I. and Slade, W. IOCCG Ocean Optics and Biogeochemistry Protocols for Satellite Ocean Colour Sensor Validation, Volume 2.0, edited by A. Neeley and I. Cetinić, IOCCG, Dartmouth, NS, Canada. DOI: 10.25607/OBP-458
3. AC-9 Meter. Protocol Document. URL: <http://www.comm-tec.com/Prods/mfgs/Wetlabs/Manuals/ac-protocol-document.pdf> (date of access: 02.08.2019).
4. Mankovsky V.I., Penkov M.N., Bondarenko A.S. Transmissometer for marine coastal station. *Monitoring System of Environment*. 2004, 37—39 (in Russian).
5. Gamma-2 Abyss Deep-Sea Transmissometer. URL: <https://www.hobilabs.com/cmsitems/attachments/3/Gamma-2%20Abyss%20Manual%20D.pdf> (date of access: 02.08.2019).

6. *Latushkin A.A., Martynov O.V.* Method for determining the spectral attenuation of direct light in seawater in situ. *Patent RU 2605640* on 27.12.2016. Int.Cl. G01N2159 (in Russian).
7. *Artemiev A.A.* et al. Transmissometer for sea water. *Patent RU 2341786* on 20.12.2008. Int.Cl. G01N 21/59 (in Russian).
8. *Pegau S., Zanevled R.V., Mueller J.L.* Inherent Optical Property Measurement Concepts: Physical Principles and Instruments, in *Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision 4, Volume IV: Inherent Optical Properties: Instruments, Characterizations, Field Measurements and Data Analysis Protocols*, NASA/TM-2003-211621/Rev4-Vol. IV, edited by J.L. Mueller, G.S. Fargion, and C.R. McClain, 1–14, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland. 2003.
9. *Twardowski M., Röttgers R., Stramski D.* The Absorption Coefficient, in *Inherent Optical Property Measurements and Protocols: Absorption Coefficient*, Neeley, A.R. (ed.), *IOCCG Ocean Optics and Biogeochemistry Protocols for Satellite Ocean Colour Sensor Validation*, Volume 1.0, 1–17, IOCCG, Dartmouth, NS, Canada. 2008.
10. *Kelbalihanov B.F., Matyushenko V.A.* Spectrophotometer. *Patent SU 1055973* on 23.11.1983. Int.Cl. G01J 3/42 (in Russian).
11. *Burenkov V.I., Kelbalihanov B.F., Kopelevich O.V.* The measurement methods of optical properties of sea water. *Ocean Optics*, Ed. A.S. Monin, Vol. 1, chapter 5, 117–118. *Moscow, Nauka*, 1983 (in Russian).
12. LED Engin. LZ7-N4M100-0000 Datasheet. URL: https://eu.mouser.com/datasheet/2/228/5412935-LED_2520Engin_Datasheet_LuxiGen_LZ7-04M100-1531974.pdf (date of access: 02.08.2019).

К статье *Ли М.Е., Фёдоров С.В.* Компенсационный подход к исключению методических погрешностей при измерениях спектральной прозрачности морской воды

Lee M.E., Fedorov S.V. Compensatory approach to exclude methodological errors in measurements of spectral transparency of seawater

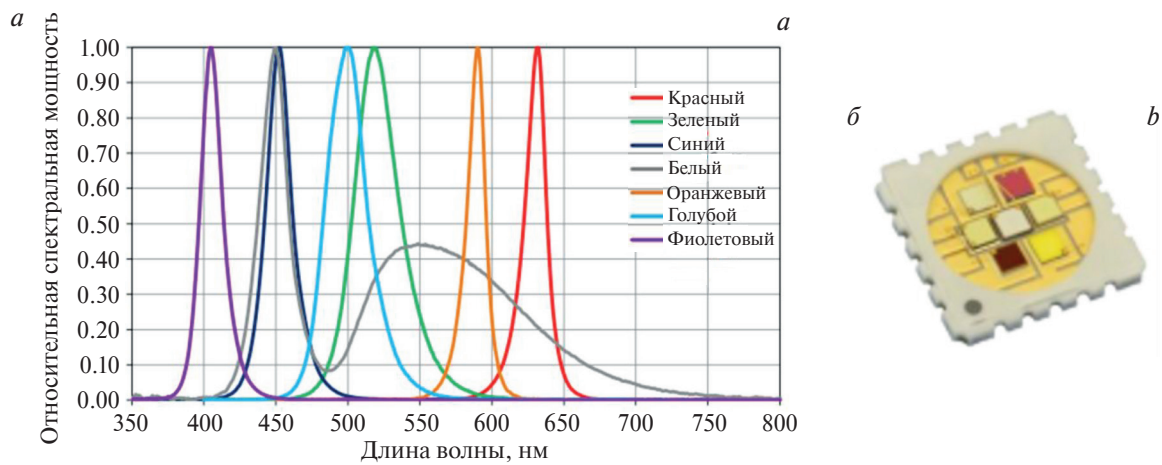


Рис. 2. Спектральные характеристики (а) и расположение светящихся элементов (б) в мощном семицветном светодиоде LZ7-04M100 [12].

Fig. 2. Spectral characteristics (a) and arrangement of luminous elements (b) in a powerful seven-color LED LZ7-04M100 [12].