

ГИДРООПТИКА ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА МОРСКИХ АКВАТОРИЙ

В статье описана разработка прибора, позволяющего определить значение показателей ослабления и прозрачности водной среды — прозрачномера. Задачами данного исследования являются: разработка математической модели прибора, создание образца и получение практических результатов. Разработанный прозрачномер может быть использован при проведении океанографических научных исследований, в сфере морской биологии и поисковых операций с использованием подводных аппаратов. При разработке нового способа измерения прозрачности водной среды используются лазерные технологии. Проведенные расчеты с применением математического моделирования позволили определить оптимальную частоту излучения лазерной системы подводного видения, минимизировать показатели ослабления водной среды, что дает направление работ по созданию эффективного прозрачномера. Испытания в реальных условиях эксплуатации показали соответствие теоретических и экспериментальных результатов.

Ключевые слова: экологический мониторинг, прозрачность, гидрооптика, водная среда, лазерный прозрачномер.

Введение. Показатель прозрачности, как одна из характеристик чистоты водной среды, применяется при исследованиях, связанных с экологией. Также использование данных сведений по всему вертикальному срезу глубин дает информацию о динамике параметров водной среды.

Анализ различных способов определения прозрачности водоёмов, проведённый автором, показал, что наиболее востребованным является способ с использованием белого диска (диска Секки). Его используют ввиду простоты реализации. [1–4] Следует, однако, отметить, что измерения прозрачности водной среды с использованием диска Секки являются достоверными только в приповерхностном слое воды в месте проведения замера. Измеряется величина Z_b , представляющая собой глубину видимости стандартного белого диска (диска Секки) диаметром 300 мм.

Реализация способа определения величины Z_b способом диска Секки осуществляется методиками, которые имеют значительные ограничения. Среди последних — жестко ограниченные погодные условия, наличие группы наблюдателей в составе от 3 до 5 человек, и пр. [5, 6].

Также ввиду того что данный способ может применяться лишь с надводного судна, определение показателя прозрачности водной среды ограничено лишь приповерхностным слоем.

Постановка цели и теоретическое обоснование. Целью описанного в работе исследования является разработка прибора способного производить измерения величины Z_b , в котором будут отсутствовать указанные выше ограничения как по сезону измерений, так и по глубине.

Для разработки данного прибора требуется решить следующие задачи: разработать математическую модель, определяемую принципом его работы; на основании предложенной модели разработать схему прибора; получить в ходе испытаний образца практические результаты.

Одно из направлений решения данных задач, изложенное в настоящей работе, основано на физических основах распространения света в водной среде — гидрооптике. На основании теоретических исследований известно, что дальность видимости белого диска Z_b и показатель ослабления водной среды ε связаны между собой математической зависимостью:

$$\varepsilon = \frac{4,7...5}{Z_b}, \quad (1)$$

где ε — показатель ослабления водной среды.

Формула (1) приведена в [7].

Свет, распространяющийся в морской среде, испытывает ослабление от двух независимых механизмов:

- рассеяния;
- поглощения.

Показатель рассеяния σ практически не зависит от длины волны, и его изменчивость целиком определяется вариациями взвешенных в воде частиц [8].

В поверхностных водах открытых океанов значение показателя рассеяния σ колеблется в пределах $0,1...0,2 \text{ м}^{-1}$ со средним значением $\sigma=0,15 \text{ м}^{-1}$, а в глубинных — $0,05...0,1 \text{ м}^{-1}$ со средним значением $\sigma=0,075 \text{ м}^{-1}$. В прибрежных районах с высокой

Таблица 1

Порядок средних значений Z_0 для морей и заливов

Район	Z_0 (м)
Баренцево море	6...24
Балтийское море	6...12
Средиземное море	
— центральная часть	20...50
— прибрежные районы	до 20
Черное море	5...28
Карское море	2...25

концентрацией взвесей среднее значение σ может повышаться до $2...3 \text{ м}^{-1}$.

Поскольку рассеяние в море практически не зависит от длины волны, область наименьшего ослабления света соответствует минимуму показателя поглощения ζ . Значение ζ в различных районах Мирового океана приходится на различные длины волн, однако во всех случаях ζ находится в пределах спектрального диапазона $\lambda = 470...570 \text{ нм}$ [9].

Показатель ослабления

$$\varepsilon = \sigma + \zeta \quad (2)$$

измерить значительно легче, чем показатели поглощения и рассеяния отдельно. Данные наиболее легко измеряемой гидрооптической характеристики Z_0 неоднократно получены и документированы в виде таблиц практически в любой точке Мирового океана [10]. Порядок средних значений Z_0 для морей и заливов, наиболее часто используемых в практических исследованиях, приведен в табл. 1.

Как видно из табл. 1, значения Z_0 в рамках одной и той же морской акватории могут изменяться, причем весьма существенно. Отметим, что диапазон разброса величин наблюдается не только на площади водной акватории, но и в зависимости от глубины. При экологическом мониторинге с применением подводных аппаратов этот фактор имеет существенное влияние в режиме придонного плавания.

Поскольку между величинами Z_0 и ε в соответствии с формулой (1) существует обратно пропорциональная зависимость, достаточно в подводном положении определить значение показателя ослабления водной среды ε и через него выразить глубину видимости диска Секки — Z_0 .

Соответствующую величину ε , отражающую ослабление света в водной среде, получают на всем диапазоне глубин при использовании средств измерения степени прозрачности водной среды. Разработка удобного для применения в широком спектре задач прозрачномера позволяет решить проблемы определения прозрачности водной среды, указанные выше.

Методы, реализуемые при создании прозрачномера, основываются на ослаблении светового потока при прохождении некоторого участка водной среды. Для составления математического аппарата, описывающего физические основы функционирования прозрачномера — измерителя показателя ослабления водной среды, автором будет использоваться закон Бугера. Анализ литературы [11–13] показал, что использование данных технологий для определения прозрачности водной среды ранее не проводилось.

Математическая модель и разработка прибора.

Для выбора направления работ по созданию прозрачномера автором предложена математическая модель исследования, определяемая принципом его работы. Он основан на измерении световой энергии, поступающей от излучателя к приемнику. Световая энергия излучателя $P(0)$ и приемника $P(L)$ в соответствии с законом Бугера связаны экспоненциальной зависимостью:

$$P(L) = P(0) \cdot \exp(-\varepsilon \cdot L) = P(0) \cdot \exp(-\tau), \quad (3)$$

где L — расстояние между излучателем и приемником; τ — оптическая (безразмерная) дальность; $P(L)$ — световая энергия излучателя; $P(0)$ — световая энергия приемника.

Из формулы (3) следует:

$$\tau = \varepsilon \cdot L. \quad (4)$$

Значение величины L всегда известно, т.к. это база между излучателем световой энергии и ее приемником, которые устанавливаются вне прочного корпуса подводного аппарата. Излучатель генерирует световую энергию излучения в водной среде, которая направляется на приемник. Оба этих изделия являются составными частями прозрачномера.

В уравнении (4), таким образом, имеются два неизвестных: τ и ε . Для его решения, т.е. нахождения показателя ослабления водной среды ε , необходимо базу L сделать величиной переменной, дистанционно изменяя расстояние между излучателем и приемником.

Фотоны света, формируемые излучателем световой энергии, при прохождении к приемнику ослабляются водной средой, поглощаясь ею и рассеиваясь. Из теории гидрооптики следует, что оптическая дальность в водной среде, при прохождении которой поток фотонов ослабляется в e раз, равна 1 и является безразмерной величиной.

Дистанционно управляя размером базы L , оператор имеет возможность добиться такого ее положения, при котором энергия светового излучения, воспринимаемая приёмником прозрачномера, в e раз меньше энергии, формируемой излучателем. В этом случае оптическая дальность τ становится равной 1 и уравнение (4) принимает простой вид:

$$1 = \varepsilon \cdot L. \quad (5)$$

Его решение не представляет трудности:

$$\varepsilon = 1/L. \quad (6)$$

Таким образом, зная расстояние между излучателем и приёмником прозрачномера, то есть его базу, можно без труда определить показатель ослабления ε водной среды [9].

Схема прибора приведена на рис. 1 и включает в себя излучатель и приёмник, которые расположены на направляющих. Измеритель мощности связан с приёмником световой энергии с помощью кабеля. Излучатель световой энергии перемещается относительно приемника с помощью электрического привода. Управление перемещением выполняет оператор. Расстояние между излучателем и приемником при выполнении измерений всегда должна быть такой, чтобы на измерителе мощности фиксировалась энергия светового излучения, в e раз меньшая той, что формируется излучателем. Тогда,

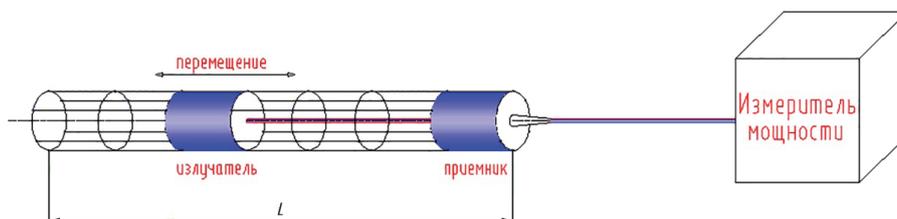
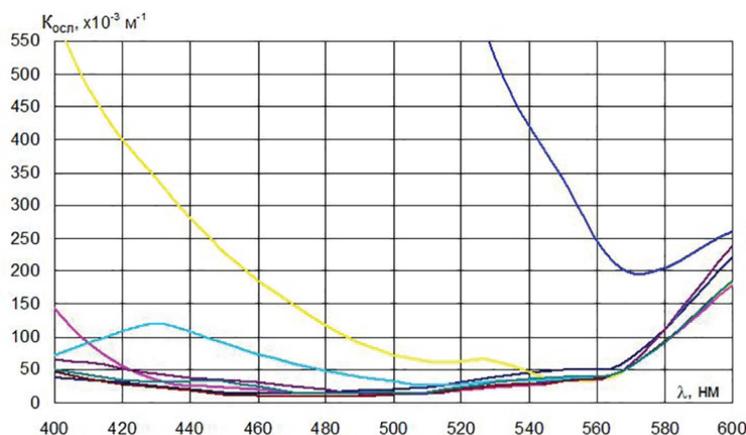


Рис. 1. Прозрачномер

Рис. 2. Зависимость показателя ослабления водной среды ϵ от частоты излучения лазерного осветителя

в соответствии с (6), показатель ослабления ϵ водной среды будет равен величине, обратной расстоянию L между излучателем и приемником световой энергии. В качестве излучателя световой энергии может быть применен лазерный осветитель. Он обладает свойствами, которые выгодно отличают его от традиционных прожекторных осветителей:

- монохроматичность;
- когерентность;
- направленность;
- мощность излучения;
- возможность перестройки частоты излучения.

Последнее свойство лазерного осветителя при его использовании в качестве излучателя прозрачномера можно использовать для снятия гидрооптического «разреза» воды. Это может быть использовано, в частности при решении задач, относящихся к области экологического мониторинга.

Смысл сказанного заключается в том, что изменение частоты излучения лазерного осветителя в оптическом диапазоне длин волн ($\lambda = 400 \dots 600$ нм) позволяет получить значение показателя ослабления водной среды ϵ для каждого дискретного значения λ .

Практические результаты применения теоретических исследований получены в ходе испытаний действующего образца прозрачномера в условиях морской акватории. По результатам проведенных измерений строится график зависимости ϵ от λ . График дает возможность определить значение частоты излучения лазерного осветителя, при котором показатель ослабления ϵ будет иметь минимальное значение. Типовые зависимости исследуемых величин приведены на рис. 2.

На приведенном графике (рис. 2) по оси ординат показаны значения показателя ослабления ϵ водной

среды. По минимальному значению ϵ определяется соответствующая ему длина волны лазерного осветителя. Это дает возможность определить частоту излучения при эксплуатации лазерной телевизионной системы, обеспечивающую максимальную дальность видимости на любой глубине подводного аппарата.

Графики, приведенные на рис. 2, получены в различных водоемах и на разных глубинах. Кривая синего цвета получена при заборе проб воды на озере Протяжка (г. Саров) с его поверхности. Кривая желтого цвета явилась результатом проведения измерений на поверхности Балтийского моря в районе Голландской впадины, а график голубого цвета получился в результате забора проб воды в Тихом океане (координаты отсутствуют) с глубины 20 метров.

Полученные пробы воды прошли спектральное исследование в лаборатории НИИ лазерной физики, г. Саров.

Перспективы дальнейших исследований. Создание прозрачномера является необходимой, но недостаточной задачей. Анализ формулы (1) показывает, что разброс коэффициентов от 4,7 до 5 не дает однозначной зависимости между величинами ϵ и Z_0 . Для ее установления требуется проведение дополнительного научного исследования, которое дало бы возможность откорректировать статистическую формулу, придав значениям ϵ и Z_0 однозначную обратно пропорциональную зависимость. Данный вопрос, представляющий собой отдельную научную задачу, является темой последующих научных исследований.

Результаты. Среди широкого спектра применения прозрачномера выделяется экологический мониторинг таких важных для освоения регионов Мирового океана как северные моря, омывающие

Российскую Федерацию, дальневосточный залив Петра Великого, а также динамика Черного моря. Активность данных исследований также обусловлена соображениями экономического характера. Необходимость всеобъемлющего знания базовых гидрооптических показателей (ϵ , ζ) требует комплексного подхода к их измерению [7].

В ходе исследования и регистрации водных течений, являющихся переносчиками загрязнений в чистые акватории, а также обратных процессов, мониторинг состояния проводят сериями глубинных промеров и соответствующей регистрацией сведений о показателях ослабления ϵ в зависимости от расстояния от водной поверхности. Это является трудоемким и длительным процессом, сильно зависящим от внешних условий. Дальнейшее исследование автора и совершенствование технологии прозрачномера допускают возможность его создания в более портативном варианте, что несомненно упростит задачу по определению показателя ϵ вдоль всего глубинного среза.

В целом следует отметить, что во всех базовых задачах возникающих в прикладной гидрооптике, непосредственно участвует процесс замера ϵ . Изучение термодинамики моря непосредственно основано на изучении характеристик основных процессов связанных с рассеянием излучения и обратных явлений его поглощения [8].

Вывод. Таким образом, обзор литературы и проведенные научные исследования позволили определить направление работ по созданию прозрачномера для подводных аппаратов. Это даст возможность применить указанное изделие для эффективного экологического мониторинга не только отдельных морских бассейнов, но и Мирового океана в целом. Кроме того, прозрачномер, созданный с использованием лазерных осветителей, существенно расширит возможности проведения океанологических научных исследований, улучшит поисковые возможности подводных аппаратов.

Библиографический список

1. Долин Л. С., Левин И. М. Справочник по теории подводного видения. Л.: Гидрометеиздат, 1991. С. 14. ISBN 5-286-00313-3.
2. Kwon Y. H., Lindley S. L. Applicability of four localized-calibration methods in underwater motion analysis // In Proceedings of the 18 International Symposium on Biomechanics in Sports. Symposium 2000, Hong Kong, China, June 25–30, 2000. P. 1–8.
3. Guo Y. 3D underwater topography rebuilding based on single beam sonar // In Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Signal Processing, Communication and Computing (ICSPCC 2013), Kunming, China, 5–8 August. 2013. P. 751–756. ISBN 978-1-4799-1026-7.
4. Andono P. N., Yuniarnomulyanto E., Hariadi M. [et al.]. 3D reconstruction of underwater coral reef images using low cost

multi-view cameras // In Proceedings of the 2012 International Conference on Multimedia Computing and Systems, Tangier, Morocco, 10–12 May. 2012. P. 803–808. DOI: 10.1109/ICMCS.2012.6320131.

5. Мартынов В. А. О влиянии разрешающей способности на контраст изображения // Вопросы оборонной техники. 2007. Сер. 16. Вып. 9-10. С. 47–56.
6. Мартынов В. А. Расчет дальности видения подводных телевизионных систем // Вопросы оборонной техники. 2007. Сер. 16. Вып. 11-12. С. 31–39.
7. Карасик В. Е., Орлов В. М. Лазерные системы видения. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. С. 193. ISBN 9785703817353.
8. Golosnoy A. S., Provotorov V. V. Accounting of externalities in the development of environmental engineering methods // Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering. MIP: Engineering-2019, Krasnoyarsk, April 4–6. Krasnoyarsk, 2019. P. 197–198.
9. Мартынов В. А., Божук Н. М., Голосной А. С. Картографирование донной поверхности с использованием лазерных технологий // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 2-2 (44). С. 69–73.
10. Голосной А. С., Мартынов В. А. Современные технологии в создании лазерных систем подводного видения в гидросфере // Изобретательство. 2013. Т. 13, № 6. С. 33–51.
11. Dominicis L. De, Fornetti G., Guarneri M. [et al.]. Structural Monitoring Of Offshore Platforms By 3d Subsea Laser Profilers // In Proceedings of the Offshore Mediterranean Conference (OMC 2013), Ravenna, Italy. 2013. URL: https://www.researchgate.net/publication/259298916_STRUCTUREL_MONITORING_OF_OFFSHORE_PLATFORMS_BY_3D_SUBSEA_LASER_PROFILERS (дата обращения: 12.08.2019).
12. Teledyne CDL. INSCAN 3D Scanning Subsea Laser. URL: <http://teledyne-cdl.com/events/inscan-demonstration-post-press-release> (дата обращения: 30.09.2015).
13. 3D at Depth. SL1 High Resolution Subsea Laser Scanner. URL: <http://www.3datdepth.com/sl1overview/> (дата обращения: 30.09.2015).

ГОЛОСНОЙ Алексей Сергеевич, аспирант кафедры общей и технической физики Санкт-Петербургского горного университета, г. Санкт-Петербург; ведущий инженер ФГБУ «ВНИИ Океангеология», г. Санкт-Петербург.
SPIN-код: 7756-6560
AuthorID (РИНЦ): 797054
Адрес для переписки: golosnoy2@yandex.ru

Для цитирования

Голосной А. С. Гидрооптика для экологического мониторинга морских акваторий // Омский научный вестник. 2019. № 5 (167). С. 124–127. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-167-124-127.

Статья поступила в редакцию 19.09.2019 г.

© А. С. Голосной