

КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ COMPUTER SCIENCE

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-3-417-427

УДК 621.396.9, 004.932.4, 550.8.05

Двухэтапный алгоритм восстановления подводных изображений для морских геологоразведочных работ

Иван Владимирович Семерник¹✉, Кристина Владимировна Самонова²

^{1,2} АО «Южморгеология», Геленджик, 353461, Российская Федерация

¹ ione7nick@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-0238-4154>

² kristi-rosa@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2449-9921>

Аннотация

Введение. Исследованы вопросы восстановления подводных изображений, подверженных искажениям в виде отклонения цветности и контрастности, наличия дымки и других, возникающим в связи с взаимодействием оптического излучения с водной средой. Восстановление подводных изображений является нетривиальной задачей в связи с большой вариативностью параметров водной среды и условий съемки. **Метод.** Предлагаемый метод, в отличие от других алгоритмов восстановления подводных изображений, базирующихся на модели формирования изображения, основан не на упрощенной оценке затухания оптического излучения в воде в виде экспоненциального закона Бера–Ламберта, а на более точном физическом подходе, заключающемся в численном моделировании распространения оптических лучей в воде с использованием метода Монте-Карло, учитывающем основные параметры водной среды и камеры. Результаты моделирования применяются для обработки изображения в пространственной области путем редактирования гистограмм каждого канала изображения в цветовом пространстве RGB. **Основные результаты.** Для тестирования разработанного алгоритма были выбраны 6 реальных подводных изображений, полученных при различных условиях освещения (естественное и искусственное) и различных параметрах водной среды (чистая океанская и мутная прибрежная вода). С целью качественного и количественного анализов полученных результатов использованы следующие аналогичные методы обработки подводных изображений: Fusion, UDCP IATP, Retinex, HE и UWB VCSE. Для количественной оценки полученных результатов использованы показатели Underwater Colour Image Quality Evaluation Metric (UCIQE) и Underwater Image Quality Measure (UIQM). Результаты качественной оценки демонстрируют высокую эффективность предлагаемого метода: вне зависимости от изображения применение метода обеспечивает улучшение визуального восприятия и не приводит к чрезмерному усилению контрастности, искажению цветности, потере детализации, появлению артефактов и пр. Количественная оценка результатов обработки подводных изображений демонстрирует сопоставимые и превосходящие результаты при сравнении с аналогичными методами. Для параметра UCIQE разработанный метод обеспечил улучшение от 9 % до 51 % относительно значения параметра для исходного изображения, при этом аналогичные методы продемонстрировали результаты от минус 10 % до 82 %. Для параметра UIQM разработанный метод обеспечил улучшение от 24 % до 99 % относительно значения параметра для исходного изображения, при этом аналогичные методы продемонстрировали результаты от минус 10 % до 123 %. В отличие от аналогов разработанный метод не продемонстрировал наихудшего значения параметров UCIQE и UIQM ни для одного обработанного изображения, что свидетельствует о стабильности метода вне зависимости от параметров водной среды и условий съемки. Благодаря разделению разработанного метода на предварительный и основной этапы обеспечивается высокая скорость обработки изображений: 0,073 с для изображения с разрешением 400×300 пикселей и от 8,02 с до 8,23 с для изображения с разрешением 5184×3456 пикселей. Аналогичные методы продемонстрировали значения от 0,19 с до 10,81 с для изображения с разрешением 400×300 пикселей и от 7,65 с до 937,83 с для изображения с разрешением 5184×3456 пикселей. **Обсуждение.** Внедрение предлагаемого метода в геологоразведочные работы повысит их эффективность и достоверность, позволит получить более точные данные для дальнейшей разработки месторождений твердых полезных ископаемых. Подобная методика, встроенная в систему машинного зрения подводных аппаратов, позволит существенно расширить их функциональные возможности за счет обеспечения возможности автоматизации операций, повышения эффективности систем распознавания.

Ключевые слова

восстановление подводных изображений, улучшение подводных изображений, обработка подводных изображений, реальные глубоководные фотографии, восстановление цвета, метод Монте-Карло, моделирование распространения света в воде

Благодарности

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 23-79-01253, <https://rscf.ru/project/23-79-01253/>.

Ссылка для цитирования: Семерник И.В., Самонова К.В. Двухэтапный алгоритм восстановления подводных изображений для морских геологоразведочных работ // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 3. С. 417–427. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-3-417-427

Two-stage algorithm for underwater image recovery for marine exploration

Ivan V. Semernik^{1✉}, Christina V. Samonova²

^{1,2} JSC Yuzhmoregeologia, Gelendzhik, 353461, Russian Federation

¹ ione7nick@yandex.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-0238-4154>

² kristi-rosa@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2449-9921>

Abstract

The paper explores the problems of restoring underwater images exposed to distortions in the form of color and contrast deformations, the presence of haze, etc., arising from the interaction of optical radiation with the aquatic environment. Restoring underwater images is a non-trivial task due to the large variability of the parameters of the aquatic environment and photography conditions. The proposed method, unlike other underwater image recovery algorithms based on an imaging model, is not based on a simplified exponential Beer-Lambert law for estimating optical radiation attenuation in water, but on a more accurate physical approach that simulates the propagation of optical rays in water using the Monte Carlo method, taking into account the main parameters the water environment and the camera. The results of numerical simulation of optical ray propagation in an aquatic environment are used for image processing in the spatial domain by editing the histograms of each image channel in the RGB color space. To test the developed algorithm, 6 real underwater images were selected obtained under various lighting conditions (natural and artificial) and various parameters of the aquatic environment (clear ocean and turbid coastal water). For the purpose of qualitative and quantitative analysis of the obtained results, the following similar underwater image processing methods were used: Fusion, UDCP IATP, Retinex, HE, and UWB VCSE. The Underwater Colour Image Quality Evaluation Metric (UCIQE) and Underwater Image Quality Measure (UIQM) indicators were used to quantify the results obtained. The results of the qualitative assessment demonstrate the high efficiency of the proposed method: regardless of the conditions of the initial image parameters, the application of the developed method improves visual perception and does not lead to excessive contrast enhancement, color distortion, loss of detail, the appearance of artifacts, etc. Quantification of underwater image processing results demonstrates comparable and superior results when comparing the efficiency of the algorithm with similar methods. For the UCIQE parameter, the developed method provided an improvement from 9 % to 51 % relative to the parameter value for the original image, while similar methods demonstrated results from minus 10 % to 82 %. For the UIQM parameter, the developed method provided an improvement from 24 % to 99 % relative to the parameter value for the original image, while similar methods demonstrated results from minus 10 % to 123 %. Unlike analogues, the developed method did not demonstrate the worst values of the UCIQE and UIQM parameters for any processed image, which indicates the stability of the method regardless of the parameters of the aquatic environment and shooting conditions. By dividing the developed method into preliminary and main stages, high image processing speed is ensured: 0.073 seconds for images with a resolution of 400×300 pixels and from 8.02 to 8.23 seconds for images with a resolution of 5184×3456 pixels. Similar methods demonstrated values from 0.19 to 10.81 seconds for an image with a resolution of 400×300 pixels and from 7.65 to 937.83 seconds for an image with a resolution of 5184×3456 pixels. The introduction of the proposed method into the geological exploration will increase their efficiency and reliability, and will provide more accurate data for further exploration of solid mineral deposits. Such technique integrated into the machine vision system of underwater vehicles will significantly expand their functionality by enabling automation of operations and improving the efficiency of recognition systems.

Keywords

underwater image recovery, underwater image enhancement, underwater image processing, true deep-sea pictures, image natural color recovery, Monte Carlo method, propagation of light in water modeling

Acknowledgements

The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 23-79-01253, <https://rscf.ru/project/23-79-01253/>.

For citation: Semernik I.V., Samonova Ch.V. Two-stage algorithm for underwater image recovery for marine exploration. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 3, pp. 417–427 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-3-417-427

Введение

В течение последних нескольких лет наблюдается возрастающий интерес к вопросу подводного машинного зрения и обработки подводных изображений [1, 2]. Одной из важнейших прикладных задач, решение которой требует получения высококачественных результатов фото- и видеосъемки морского дна, является проведение глубоководных геологоразведочных работ [3]. Из-за особенностей водной среды, сложного характера распространения оптического излучения в воде и условий освещения, устранение искажений (восстановление) или улучшение качества (повышение контрастности, яркости, устранение дымки и других) является нетривиальной задачей [4, 5].

Существующие в настоящее время методы обработки подводных изображений можно разделить на следующие основные группы: основанные на применении физических моделей [6–8] (методы восстановления изображений), не основанные на применении физических моделей [1, 9–11] (методы улучшения изображений) и методы на основе машинного обучения нейронных сетей [12].

Так, в работе [9] предложено осуществлять растягивание гистограмм в RGB и HSV цветовых пространствах для улучшения контрастности и насыщенности изображения. В работе [10] представлен подход на основе нормализации гистограмм изображения, направленный на повышение контрастности и балансировку цвета. В [11] представлен метод на основе изменения цветности, контрастности и резкости изображения путем пошагового изменения указанных параметров и оценки количественных параметров для выбора оптимального результата. Указанные методы обеспечивают высокую скорость обработки, но относятся к категории методов улучшения изображений, так как они не основаны на физических моделях и направлены исключительно на повышение визуального восприятия, что может привести к некорректным результатам обработки подводных изображений в части нарушения цветокоррекции.

Основным достоинством методов улучшения качества подводных изображений является возможность повышения визуального восприятия подводного объекта. Существенный недостаток — подобные алгоритмы не опираются на физическую модель распространения света в воде, что приводит к искажению цвета подводных объектов.

Одними из основных подходов, основанных на физических принципах, является метод темного канала (DCP) [6], метод подводного темного канала (UDCP), метод максимальной интенсивности (MIP), метод красного канала (RCP) и другие. Метод DCP позволяет, в первую очередь, устранить дымку на подводных изображениях и основан на допущении, что подводные изображения хорошего качества имеют некоторое количество пикселей с очень малой интенсивностью как минимум в канале одного цвета. Методы на основе DCP и MIP могут приводить к неверным результатам в случае, если условия съемки и освещения не соответствуют основным допущениям, лежащим в основе этих

методов [13]. Применение искусственного освещения приводит к наличию более светлых объектов на переднем плане и более темных объектов на заднем плане изображения, что отличается от результатов съемки при естественном освещении (наличие светлого фона на изображении) и приводит к неверной оценке глубины сцены методами на основе DCP и MIP [13].

Вторым основным направлением в числе методов, основанных на физических принципах, является применение модели формирования изображения (IFM) и оптических свойств водной среды [12]. В работе [7] предложен метод на основе априорной информации с элементами методов обработки в пространственной области и корректировкой контрастности путем нормализации гистограммы. В [8] представлен итерационный метод на основе оптической модели IFM с учетом условий освещенности.

Основное преимущество методов, основанных на применении физических моделей: восстановление естественных цветов подводных объектов. Недостатки: относительная сложность реализации, более высокая длительность обработки изображений по сравнению с методами улучшения изображений, высокая вероятность некорректной работы при использовании искусственного освещения при проведении съемки.

Методы, основанные на применении глубокого обучения, обладают неоспоримыми преимуществами (простота применения, высокое быстроедействие, улучшение визуального восприятия), но существенным недостатком нейронных сетей является их обучение на парах изображений (с добавлением дымки, сдвига цвета в зеленую или синюю область спектра и другие). При этом зачастую подобные методы после обучения демонстрируют худшие результаты при обработке реальных подводных изображений [14].

Таким образом, задача реализации относительно простого в применении и эффективного метода обработки изображений, основанного на физической модели распространения света в воде и обеспечивающего восстановление естественных цветов подводных объектов в том числе и при использовании искусственного освещения (что является неизбежным при осуществлении глубоководной съемки), является актуальной.

Модель формирования изображения

В большинстве алгоритмов обработки подводных изображений используется модель формирования изображения, предложенная в [15] и показанная на рис. 1:

$$I_c(x) = t_c(x)J_c(x) + (1 - t_c(x))A_c,$$

где $c \in \{R, G, B\}$ — индекс цветового канала; x — координаты пиксела; I_c — изображение объекта в цветовом канале c , фиксируемое камерой; t_c — коэффициент передачи для цветового канала c ; J_c — излучение от объекта, которое необходимо зафиксировать на изображении; A_c — фоновая освещенность части изображения, на которой отсутствуют объекты. Наличие фоновой освещенности, а также рассеяние прямого и фонового света приводит к снижению контрастности

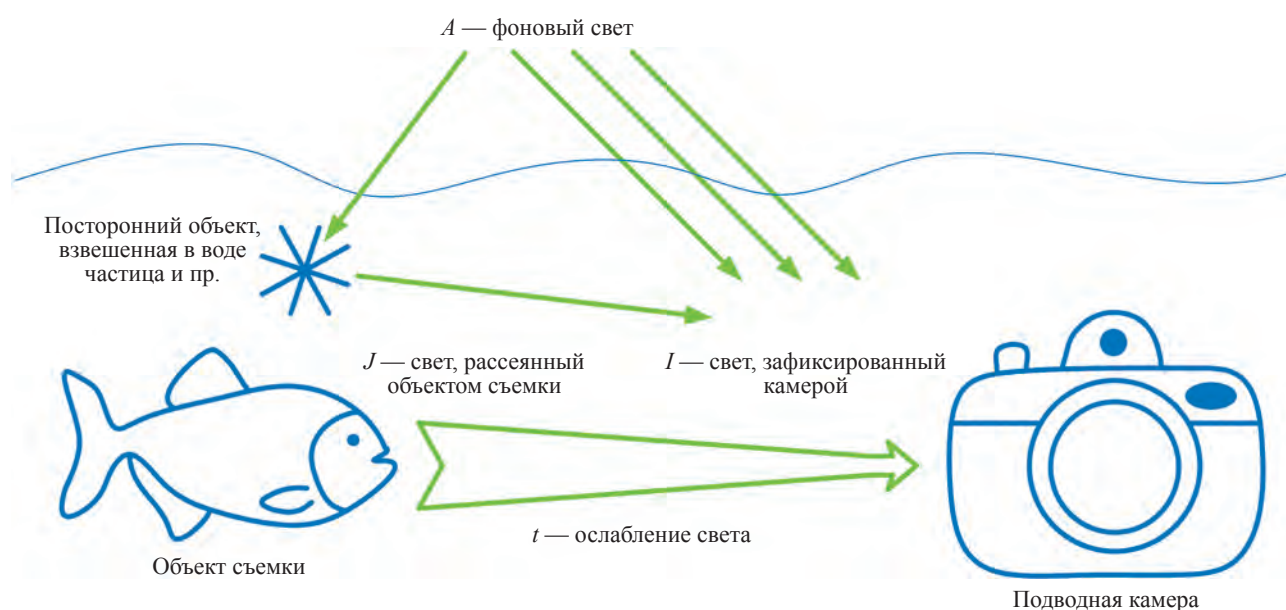


Рис. 1. Упрощенная модель формирования изображения

Fig. 1. Simplified image formation model

кадра, появлению дымки на изображении. $I_c(x)$ и $J_c(x)$ нормированы и их значения находятся в пределах диапазона от 0 до 1.

Карта пропускания t , характеризующая ослабление интенсивности света в каждом канале изображения, в упрощенном виде может быть определена на основе закона Бера–Ламберта [4, 5], характеризующего экспоненциальный закон затухания оптического излучения при распространении в воде:

$$t_c(x) = \exp(-\beta_c z(x)),$$

где β_c — коэффициент ослабления оптического излучения в воде для соответствующего цветового канала (длины волны оптического излучения); $z(x)$ — расстояние от объектива камеры до объекта на изображении с координатами x .

Экспоненциальный закон широко применяется в различных методиках восстановления подводных изображений для описания процесса затухания света в воде.

Применение закона Бера–Ламберта является наиболее простым, но наименее точным методом моделирования распространения света в водной среде.

Предпринимаются попытки уточнить закон ослабления света в воде. Так, в работе [16] предложен более точный закон, описывающий распространение света в воде за счет отдельной оценки коэффициента ослабления для прямого света, рассеянного объектом съемки, и фонового света. Однако для осуществления оценки коэффициентов ослабления используются цветные таблицы, размещаемые возле объекта съемки. Подобный подход позволяет точно оценить и в дальнейшем восстановить естественные цвета подводных объектов, но требует проведения подготовки к съемке, которая трудно осуществима в случае глубоководной съемки с применением подводных аппаратов и невозможна в случае осуществления площадной съемки при осмотре

состояния подводного объекта (трубопровода, подводного сооружения и других), выполнении глубоководных геологоразведочных работ и других.

Более совершенный вариант алгоритма [16] предложен в работе [17] и позволяет за счет применения более разветвленного алгоритма осуществлять настройку метода в зависимости от особенностей условий съемки. Однако данный алгоритм неприменим к результатам глубоководной съемки в связи с отсутствием фоновой освещенности и использованием искусственных источников света для освещения подводной сцены, так как это приводит к некорректной оценке глубины сцены и, как следствие, неверному восстановлению цветов подводных объектов.

В настоящей работе предлагается вместо упрощенного экспоненциального закона использовать более точный подход, заключающийся в численном решении уравнения переноса излучения с применением метода Монте-Карло [18, 19]. Подход, заключающийся в моделировании распространения оптических лучей в воде, нашел широкое применение при решении задачи моделирования беспроводных подводных систем оптической связи, однако в задачах восстановления подводных изображений до настоящего времени не использовался. При этом подобный подход основан на физической модели, учитывающей основные параметры водной среды (замутненность, соленость, температура воды, концентрация хлорофилла, соленость и т. д.), а также параметры камеры (угол обзора, диаметр объектива и другие), и позволяет учитывать влияние на распространение света не только ослабления, но также явления многократного рассеяния, дисперсии оптического излучения и параметров объектива фотоприемного устройства [20].

Алгоритм моделирования распространения оптического излучения в воде с использованием метода Монте-Карло приведен на рис. 2.

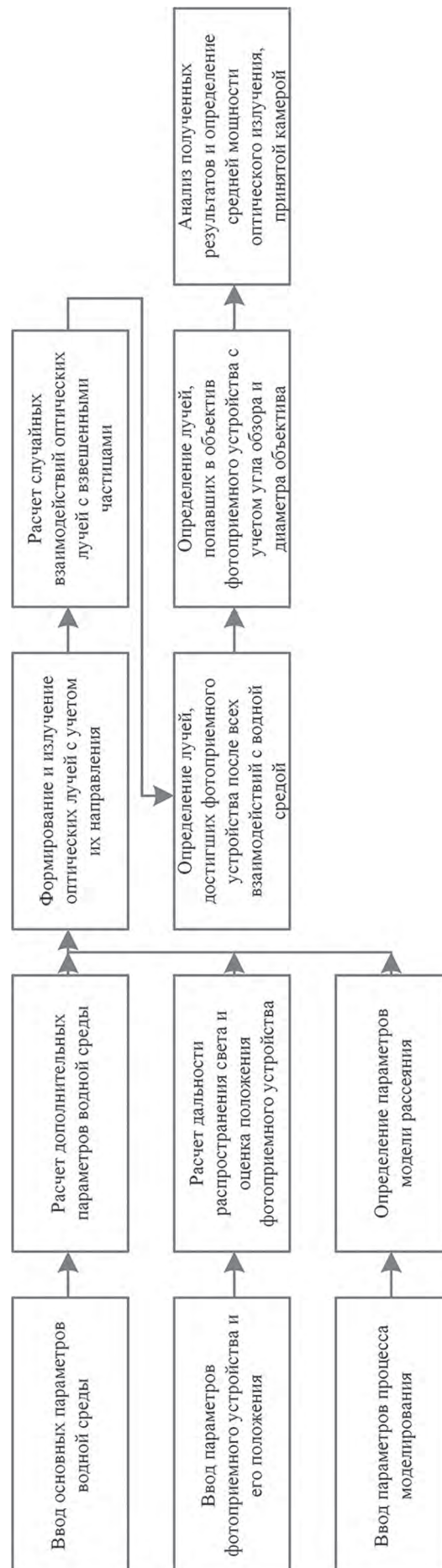


Рис. 2. Алгоритм моделирования распространения оптического излучения в воде с использованием метода Монте-Карло
 Fig. 2. An algorithm for modeling the propagation of optical radiation in water using the Monte Carlo method

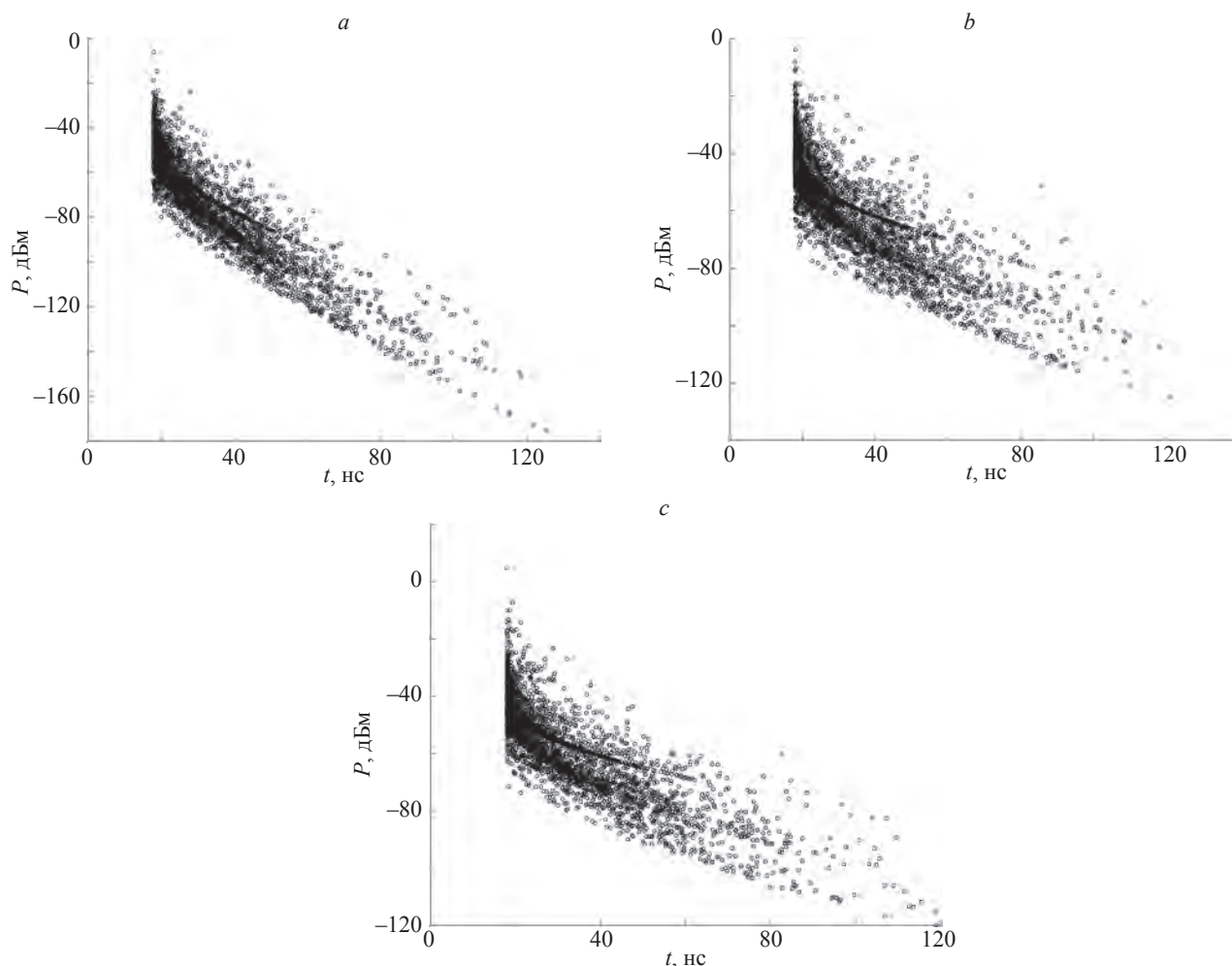


Рис. 3. Результаты моделирования распространения оптических лучей в воде с применением метода Монте-Карло для длин волн: 670 нм (a), 530 нм (b) и 485 нм (c). P — мощность луча, t — время прихода луча

Fig. 3. The results of modeling the propagation of optical rays in water using the Monte Carlo method for wavelengths of 670 nm (a), 530 nm (b) and 485 nm (c). The vertical axis is the ray power, the horizontal is the time of arrival of the ray

В результате моделирования распространения оптических лучей в воде с применением метода Монте-Карло получается матрица, содержащая сведения о мощности и времени приема каждого луча фотоприемным устройством. Результаты моделирования для чистой океанской воды и дальности 4 м приведены на рис. 3.

В связи с тем, что метод Монте-Карло является вероятностным методом, то с целью получения достоверного результата в качестве мощности оптического излучения используется значение средней мощности оптических лучей, принятых фотоприемным устройством. Это позволяет исключить влияние вероятности некорректной оценки мощности отдельных лучей.

Так как параметры модели, используемой для трассировки оптических лучей методом Монте-Карло, имеют четкий физический смысл, то в случае необходимости может быть проведен расчет для наборов параметров, характеризующих водную среду в месте проведения подводной съемки.

Методы количественной оценки качества подводных изображений

Методы количественной оценки качества подводных изображений можно разделить на две основные группы: методы на основе сравнения с эталоном и методы, не требующие эталона. В связи с тем, что при восстановлении реальных подводных изображений отсутствует эталонные версии этих изображений, то методы количественной оценки на основе сравнения с эталоном не могут быть применены. Основные методы количественной оценки качества подводных изображений, не требующих эталона: Underwater Colour Image Quality Evaluation Metric (UCIQE) [21], Underwater Image Quality Measure (UIQM) [22] и Patch-based Contrast Quality Index (PCQI) [23]. Наиболее часто применяемыми для анализа качества подводных изображений методами количественной оценки являются UCIQE и UIQM [4].

Индекс UCIQE основан на комбинации цветности, насыщенности и контрастности изображения в модели CIE-Lab:

$$UCIQE = c_1 \cdot \sigma_c + c_2 \cdot \text{con}_1 + c_3 \cdot \mu_s,$$

где σ_c , con_1 и μ_s — отклонения цветности, контрастности и насыщенности от средних значений; $c_1 = 0,4859$, $c_2 = 0,2745$, $c_3 = 0,2576$ — весовые коэффициенты [4]. Большее значение UCIQE соответствует лучшему балансу между компонентами.

Индекс UIQM представляет собой комбинацию трех показателей: UICM для оценки цветности, UISM для оценки четкости и UIConM для оценки контрастности:

$$UIQM = c_1 \cdot UICM + c_2 \cdot UISM + c_3 \cdot UIConM,$$

где $c_1 = 0,0282$, $c_2 = 0,2953$, $c_3 = 3,5753$ — весовые коэффициенты [4]. Большее значение индекса UIQM характеризует лучшее визуальное восприятие изображения.

Индексы UCIQE и UIQM являются безразмерными.

Описание предлагаемого метода

Предлагаемый в настоящей работе метод обработки подводных изображений основан на уточненной модели в виде численного моделирования трассировки оптических лучей методом Монте-Карло с последующей корректировкой гистограмм каждого канала изображения в цветовом пространстве RGB. Алгоритм обработки изображения разделяется на два основных этапа: предварительный и основной.

Предварительный этап заключается в численном моделировании трассировки оптических лучей методом Монте-Карло [18, 24, 25] с длинами волн, соответствующими трем основным цветам (красному, зеленому и синему) с использованием алгоритма описанного в разделе «Модель формирования изображения» с целью определения матрицы соотношения коэффициентов ослабления оптического излучения в воде для света красного (R), синего (B) и зеленого (G) цветов для различных параметров водной среды и условий съемки:

$$\beta_{RG} = P_R/P_G, \beta_{RB} = P_R/P_B, \beta_{BG} = P_B/P_G.$$

Каждый элемент полученной матрицы представляет собой отношение мощностей оптических сигналов указанных цветов для определенного набора параметров водной среды и дальности между камерой и объектом съемки.

Основной этап алгоритма обработки заключается в восстановлении естественного соотношения яркостей цветовых компонентов изображения на основании сформированной на предварительном этапе матрицы, а также имеющихся сведений об условиях съемки: степени мутности воды (чистая вода, прибрежная вода, мутная вода) и глубины сцены (дальности до объекта съемки) путем коррекции гистограммы каждого канала изображения (R, G, B) с применением значений β_{RG} , β_{RB} , β_{BG} .

Глубина сцены может быть определена с применением альтиметра, дальнометра или иного устройства, установленного на подводном аппарате, используемом для подводной съемки.

Восстановление цветности изображения осуществляется путем растягивания гистограмм каждого канала изображения следующим образом:

$$\begin{aligned} H'_R &= H_R \left\{ 0 \dots \left(\frac{1}{\beta_{RG}\beta_{RB}} \right) \right\}, \\ H'_G &= H_G \left\{ \left(1 - \frac{1}{\beta_{RG}\beta_{BG}} \right) \dots 1 \right\}, \\ H'_B &= H_B \left\{ \left(1 - \frac{1}{\beta_{RB}\beta_{BG}} \right) \dots 1 \right\}, \end{aligned}$$

где R, G, B — индекс цветового канала; $H_{R,G,B}$ — гистограмма соответствующего канала исходного изображения; $H'_{R,G,B}$ — гистограмма соответствующего канала обработанного изображения; в фигурных скобках указаны пределы контрастности изображения в диапазоне $[0, 1]$. С целью повышения контрастности обрабатываемого подводного изображения применяется гамма-коррекция исходного изображения на основании соотношений коэффициентов ослабления оптического излучения в воде (β_{RG} , β_{RB} , β_{BG}):

$$\begin{aligned} I'_c(x) &= I_c(x)^{\gamma_c}, \\ \gamma_R &= \frac{1}{\beta_{RG}\beta_{RB}}, \gamma_G = \frac{1}{\beta_{RG}\beta_{BG}}, \gamma_B = \frac{1}{\beta_{RB}\beta_{BG}}, \end{aligned}$$

где $c \in \{R, G, B\}$ — индекс цветового канала; I_c — исходное изображение; I'_c — обработанное изображение.

Разработанный метод основан на физической модели водной среды, имеет большую вариативность при настройке параметров водной среды на предварительном этапе, а также лишен недостатков методов на основе DCP и MIP, связанных с некорректной обработкой изображений, полученных при использовании искусственного освещения из-за неверной оценки глубины сцены, приводящей к перекомпенсации цветовых компонентов изображения и, следовательно, искажению цветности подводных объектов.

Предварительный этап обработки является более трудоемким в части использования вычислительных ресурсов, но выполняется единожды на этапе подготовки и после формирования матрицы данных не повторяется.

Основной этап обработки прост в реализации и не требователен к наличию вычислительных ресурсов, что позволяет его применять на базе различных платформ, что значительно расширяет область применения предлагаемого метода. Кроме того, разделение алгоритма на две части обеспечивает существенное ускорение процесса за счет того, что при обработке изображения выполняется только основной этап алгоритма.

Разработанный алгоритм объединяет точность восстановления подводных изображений (так как основан на точной физической модели распространения света в воде и учитывает эффекты ослабления, рассеяния и дисперсии света) и быстроту алгоритмов улучшения качества изображений. При этом точность восстановления цветов подводного объекта определяется достоверностью оценки глубины сцены (дальности до

объекта) и корректностью задания набора параметров физической модели при осуществлении моделирования распространения световых лучей на предварительном этапе алгоритма.

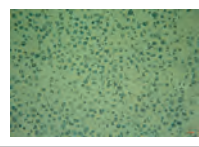
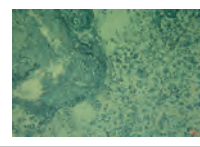
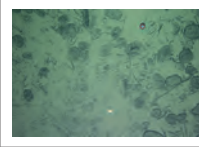
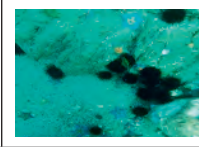
Полученные результаты

Для тестирования выбрано 6 изображений, представленных в табл. 1. Все расчеты выполнены на персональном компьютере на базе операционной системы

Windows 10 с процессором Intel(R) Core(TM) i5-7400 и 16 ГБ оперативной памяти.

Для оценки предлагаемого метода обработки подводных изображений произведено сравнение качественных и количественных показателей со следующими методами обработки: Fusion [27], UDCP+IATP [28], Retinex [29], HE [30] и UWB VCSE [31]. Указанные методы являются широко применяемыми подходами к восстановлению и улучшению качества подводных изображений [4, 5].

Таблица 1. Исходные изображения
Table 1. Original images

Номер изображения					
1	2	3	4	5	6
Размер изображения, пиксели					
5184 × 3456			720 × 405	400 × 300	
					

Примечание. Изображения 1–3 получены в ходе геологоразведочных работ в районе Кларион-Клиппертон в северной приэкваториальной области Северо-Восточной котловины Тихого океана с глубинами более 5500 м с использованием искусственного освещения; 4–6 взяты из базы изображений LSUI [26].

Таблица 2. Результаты качественной оценки эффективности методов обработки
Table 2. The results of a qualitative assessment of the effectiveness of processing methods

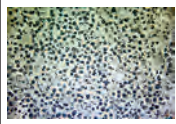
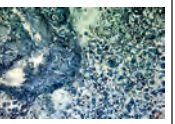
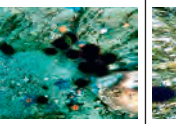
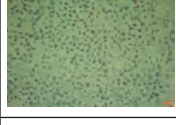
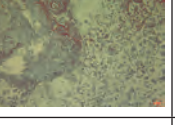
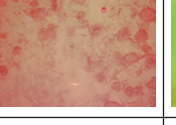
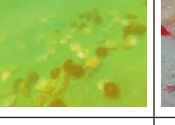
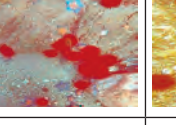
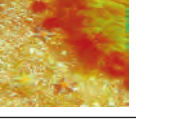
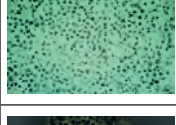
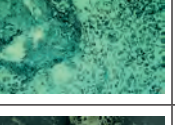
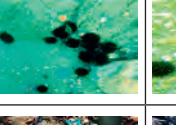
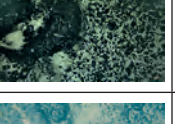
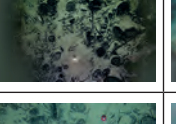
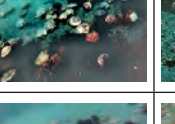
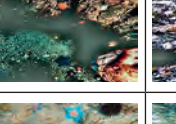
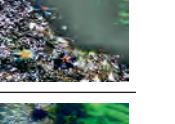
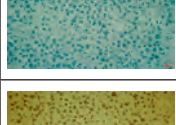
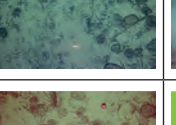
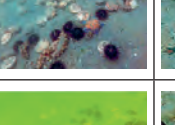
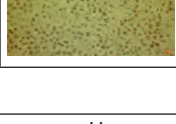
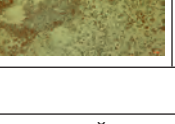
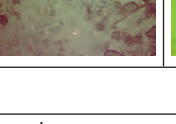
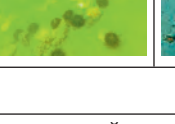
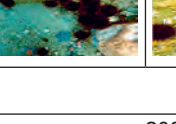
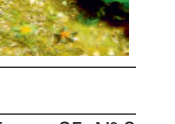
Метод обработки	Номер изображения					
	1	2	3	4	5	6
Fusion						
UDCP + IATP						
Retinex						
HE						
UWB VCSE						
Предлагаемый						

Таблица 3. Результаты количественной оценки эффективности методов обработки
 Table 3. Results of a quantitative assessment of the effectiveness of processing methods

Метод обработки	Номер изображения						Номер изображения					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
	UCIQE						UIQM					
IN	0,373	0,397	0,359	0,338	0,516	0,541	2,978	3,185	2,93	−1,372	2,32	3,561
Fusion	0,576	0,59	0,556	0,614	0,605	0,589	4,946	4,635	4,878	2,469	3,895	4,626
UDCP + IATP	0,358	0,374	0,362	0,352	0,505	0,515	2,998	3,587	4,451	0,581	5,076	5,562
Retinex	0,483	0,499	0,485	0,513	0,559	0,573	2,690	3,046	3,035	1,177	2,143	3,392
HE	0,452	0,489	0,462	0,52	0,599	0,558	4,390	4,274	3,950	2,408	4,127	3,592
UWB VCSE	0,391	0,422	0,402	0,478	0,551	0,542	2,930	3,369	3,729	2,368	5,179	5,106
Предлагаемый	0,513	0,519	0,489	0,511	0,560	0,631	3,683	4,142	4,586	1,206	4,614	4,656

Примечание. Зеленым цветом выделено два наилучших результата, красным — два наихудших значения для каждого показателя.

Таблица 4. Результаты оценки времени обработки подводных изображений, с
 Table 4. The results of estimating the processing time of underwater images, s

Метод обработки	Номер изображения					
	1	2	3	4	5	6
	Размер изображения, пиксели					
	5184 × 3456			720 × 405	400 × 300	
Fusion	22,83	22,83	27,37	2,23	1,19	1,16
UDCP + IATP	84,17	82,77	83,31	4,09	1,63	1,61
Retinex	7,75	7,65	7,76	0,26	0,19	0,19
HE	15,06	15,15	15,99	1,35	1,09	1,14
UWB VCSE	925,57	937,83	927,49	18,77	9,38	10,81
Предлагаемый	8,23	8,05	8,02	0,11	0,07	0,073

Примечание. Зеленым цветом выделено два наилучших результата, красным — два наихудших значения для каждого показателя.

В табл. 2 приведены результаты восстановления исходных изображений с помощью предлагаемого и указанных методов обработки.

В табл. 3 и 4 приведены результаты количественной оценки эффективности предлагаемого метода.

Из полученных результатов видно, что предлагаемый метод обработки подводных изображений демонстрирует эффективность, качественная и количественная оценка которой близка к наиболее эффективным методам улучшения подводных изображений, либо превосходит их.

При использовании метода Fusion для изображений 1–3 (табл. 2) наблюдается чрезмерное увеличение контрастности и искажение цветности изображения. В результате применения метода UDCP+IATP наблюдается искажение цветности темных участков изображений вплоть до их окрашивания в красные оттенки. Применение метода Retinex обеспечивает недостаточное устранение смещения цветов в сине-зеленую область спектра видимого света. В результате применения метода HE на темных участках изображений возникают серые области с равномерным фоном и отсутствием объектов. Применение метода UWB VCSE для изображений 1–3 привело к недостаточно-

му устранению синей дымки и низкой контрастности изображений.

Необходимо отметить высокую стабильность предлагаемого метода в части эффективности обработки подводных изображений (табл. 3 и 4). Значения количественных показателей оценки для предлагаемого метода сопоставимы, либо превосходят значения аналогичных показателей для остальных методов. Предлагаемый метод продемонстрировал второй результат среди анализируемых методов по скорости обработки изображений. Ускорение достигается разделением алгоритма на два этапа — подготовительный и основной. Подготовительный этап выполняется заранее единожды и далее при обработке изображений повторно не выполняется.

Заключение

В работе представлен метод обработки подводных изображений, направленный на восстановление естественных цветов подводных объектов и улучшение контрастности изображений.

В результате качественной и количественной оценок с использованием реальных глубоководных фотографий

морского дна, полученных в ходе геологоразведочных работ, показана высокая эффективность и быстродействие предлагаемого метода, сопоставимая или превосходящая в отдельных случаях показатели известных аналогичных алгоритмов обработки подводных изображений.

Преимущество предлагаемого метода заключается в применении физической модели высокой точности на

основе численного моделирования трассировки оптических лучей методом Монте-Карло.

Основное направление дальнейших исследований заключается в реализации алгоритма восстановления подводных изображений в том числе для любого типа воды, а также мутной воды с высоким содержанием хлорофилла.

Литература

1. Zhou J., Pang L., Zhang D., Zhang W. Underwater image enhancement method via multi-interval subhistogram perspective equalization // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2023. V. 48. N 2. P. 474–488. <https://doi.org/10.1109/joe.2022.3223733f>
2. Zhang W., Liu W., Li L. Underwater single-image restoration with transmission estimation using color constancy // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. V. 10. N 3. P. 430. <https://doi.org/10.3390/jmse10030430>
3. Анисимов И.М., Римский-Корсаков Н.А., Тронза С.Н. Развитие глубоководных технологий визуальных наблюдений рельефа дна и подводных объектов // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2019. № 10. С. 149–153. <https://doi.org/10.17513/mjpf.12883>
4. Zhou J., Zhang D., Zhang W. The Classical and state-of-the-art approaches for underwater image defogging: a comprehensive survey // *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*. 2020. V. 21. N 12. P. 1745–1769. <https://doi.org/10.1631/FITEE.2000190>
5. Zhang W., Dong L., Pan X., Zou P., Qin L., Xu W. A Survey of restoration and enhancement for underwater images // *IEEE Access*. 2019. V. 7. P. 182259–182279. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2959560>
6. He K., Sun J., Tang X. Single image haze removal using dark channel prior // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2011. V. 33. N 12. P. 2341–2353. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2010.168>
7. Chang H.H., Chen P.F., Guo J.K., Sung C.C. A self-adaptive single underwater image restoration algorithm for improving graphic quality // *Eurasip Journal on Image and Video Processing*. 2020. V. 2020. N 1. P. 41. <https://doi.org/10.1186/s13640-020-00528-0>
8. Zhang T., Li Q., Li Y., Liu X. Underwater Optical Image Restoration Method for Natural/Artificial Light // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. V. 11. N 3. P. 470. <https://doi.org/10.3390/jmse11030470>
9. Iqbal K., Odetayo M., James A. Enhancing the low quality images using unsupervised colour correction method // *Proc. of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. 2010. P. 1703–1709. <https://doi.org/10.1109/icsmc.2010.5642311>
10. Pandey V., Padmakumar A., Padmakumar A., Rasal T., Khandelwal H. Underwater image enhancement and restoration using AI & ML // *International Journal of Research Publication and Reviews*. 2023. V. 4. N 4. P. 3372–3377.
11. Joel Fathimson, J. Bibis S., Aswanth R., Gayatri S. Underwater image restoration using UICCS Method in Matlab // *International Journal of New Technology and Research (IJNTR)*. 2018. V. 4. N 2. P. 1–6.
12. Li C., Guo C., Ren W., Cong R., Hou J., Kwong S., Tao D. An underwater image enhancement benchmark dataset and beyond // *IEEE Transactions on Image Processing*. 2020. V. 29. P. 4376–4389. <https://doi.org/10.1109/TIP.2019.2955241>
13. Peng Y-T., Cosman P.C. Underwater image restoration based on image blurriness and light absorption // *IEEE Transactions on Image Processing*. 2017. V. 26. N 4. P. 1579–1594. <https://doi.org/10.1109/TIP.2017.2663846>
14. Xu Y., Wang H., Cooper G.D., Rong S., Sun W. Learning-based dark and blurred underwater image restoration // *Complexity*. 2020. V. 2020. P. 6549410. <https://doi.org/10.1155/2020/6549410>
15. Schechner Y.Y., Karpel N. Recovery of underwater visibility and structure by polarization analysis // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2005. V. 30. N 3. P. 570–587. <https://doi.org/10.1109/JOE.2005.850871>

References

1. Zhou J., Pang L., Zhang D., Zhang W. Underwater image enhancement method via multi-interval subhistogram perspective equalization. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2023. V. 48. N 2. P. 474–488. <https://doi.org/10.1109/joe.2022.3223733>
2. Zhang W., Liu W., Li L. Underwater single-image restoration with transmission estimation using color constancy. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. V. 10. N 3. P. 430. <https://doi.org/10.3390/jmse10030430>
3. Anisimov I.M., Rimskiy-Korsakov N.A., Tronza S.N. Bottom relief and underwater objects visual deep-water observations technologies development. *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2019, no. 10, pp. 149–153. (in Russian). <https://doi.org/10.17513/mjpf.12883>
4. Zhou J., Zhang D., Zhang W. The Classical and state-of-the-art approaches for underwater image defogging: a comprehensive survey. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2020, vol. 21, no. 12, pp. 1745–1769. <https://doi.org/10.1631/FITEE.2000190>
5. Zhang W., Dong L., Pan X., Zou P., Qin L., Xu W. A Survey of restoration and enhancement for underwater images. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 182259–182279. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2959560>
6. He K., Sun J., Tang X. Single image haze removal using dark channel prior. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, vol. 33, no. 12, pp. 2341–2353. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2010.168>
7. Chang H.H., Chen P.F., Guo J.K., Sung C.C. A self-adaptive single underwater image restoration algorithm for improving graphic quality. *Eurasip Journal on Image and Video Processing*, 2020, vol. 2020, no. 1, pp. 41. <https://doi.org/10.1186/s13640-020-00528-0>
8. Zhang T., Li Q., Li Y., Liu X. Underwater Optical Image Restoration Method for Natural/Artificial Light. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, vol. 11, no. 3, pp. 470. <https://doi.org/10.3390/jmse11030470>
9. Iqbal K., Odetayo M., James A. Enhancing the low quality images using unsupervised colour correction method. *Proc. of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2010, pp. 1703–1709. <https://doi.org/10.1109/icsmc.2010.5642311>
10. Pandey V., Padmakumar A., Padmakumar A., Rasal T., Khandelwal H. Underwater image enhancement and restoration using AI & ML. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 2023, vol. 4, no. 4, pp. 3372–3377.
11. Joel Fathimson, J. Bibis S., Aswanth R., Gayatri S. Underwater image restoration using UICCS Method in Matlab. *International Journal of New Technology and Research (IJNTR)*, 2018, vol. 4, no. 2, pp. 1–6.
12. Li C., Guo C., Ren W., Cong R., Hou J., Kwong S., Tao D. An underwater image enhancement benchmark dataset and beyond. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2020, vol. 29, pp. 4376–4389. <https://doi.org/10.1109/TIP.2019.2955241>
13. Peng Y-T., Cosman P.C. Underwater image restoration based on image blurriness and light absorption. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2017, vol. 26, no. 4, pp. 1579–1594. <https://doi.org/10.1109/TIP.2017.2663846>
14. Xu Y., Wang H., Cooper G.D., Rong S., Sun W. Learning-based dark and blurred underwater image restoration. *Complexity*, 2020, vol. 2020, pp. 6549410. <https://doi.org/10.1155/2020/6549410>
15. Schechner Y.Y., Karpel N. Recovery of underwater visibility and structure by polarization analysis. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2005, vol. 30, no. 3, pp. 570–587. <https://doi.org/10.1109/JOE.2005.850871>

16. Akkaynak D., Treibitz T. A revised underwater image formation model // *Proc. of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2018. P. 6723–6732. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00703>
17. Pei S.C., Chen C.Y. Underwater images enhancement by revised underwater images formation model // *IEEE Access*. 2022. V. 10. P. 108817–108831. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3213340>
18. Mobley C.D., Gentili B., Gordon H.R., Jin Z., Kattawar G.W., Morel A., Reinersman P., Stamnes K., Stavn R.H. Comparison of numerical models for computing underwater light fields // *Applied Optics*. 1993. V. 32. N 36. P. 7484–7504. <https://doi.org/10.1364/AO.32.007484>
19. Semernik I.V., Demyanenko A.V., Samonova C.V., Bender O.V., Tarasenko A. Modelling of an underwater wireless optical communication channel // *Proc. of the Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*. 2023. P. 468–471. <https://doi.org/10.1109/rsemw58451.2023.10202133>
20. Ramley I., Alzayed H.M., Al-Hadeethi Y., Chen M., Barasheed A.Z. An overview of underwater optical wireless communication channel simulations with a focus on the Monte Carlo method // *Mathematics*. 2024. V. 12. N 24. P. 3904. <https://doi.org/10.3390/math12243904>
21. Yang M., Sowmya A. An underwater color image quality evaluation metric // *IEEE Transactions on Image Processing*. 2015. V. 24. N 12. P. 6062–6071. <https://doi.org/10.1109/TIP.2015.2491020>
22. Panetta K., Gao C., Agaian S. Human-visual-system-inspired underwater image quality measures // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2016. V. 41. N 3. P. 541–551. <https://doi.org/10.1109/JOE.2015.2469915>
23. Wang S.Q., Ma K.D., Yeganeh H., Wang Z., Lin W. A patch-structure representation method for quality assessment of contrast changed images // *IEEE Signal Processing Letters*. 2015. V. 22. N 12. P. 2387–2390. <https://doi.org/10.1109/LSP.2015.2487369>
24. Семерник И.В. Модель водной среды для точного моделирования распространения оптического излучения // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2024. № 7. С. 61–66.
25. Семерник И.В. Моделирование распространения оптического излучения для восстановления изображений в рамках морских геологоразведочных работ // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2024. № 8 (146). С. 16. <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.24>
26. Peng L., Zhu C., Bian L. U-Shape transformer for underwater image enhancement // *IEEE Transactions on Image Processing*. 2023. V. 32. P. 3066–3079. <https://doi.org/10.1109/TIP.2023.3276332>
27. Ancuti C., Ancuti C.O., Haber T., Bekaert P. Enhancing underwater images and videos by fusion // *Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2012. P. 81–88. <https://doi.org/10.1109/cvpr.2012.6247661>
28. Zhang M., Peng J. Underwater image restoration based on a new underwater image formation Model // *IEEE Access*. 2018. V. 6. P. 58634–58644. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2875344>
29. Fu X., Zhuang P., Huang Y., Liao Y., Zhang X.-P., Ding X. A Retinex-based enhancing approach for single underwater image // *Proc. of the IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. 2014. P. 4572–4576. <https://doi.org/10.1109/icip.2014.7025927>
30. Fu X., Fan Z., Ling M., Huang Y., Ding X. Two-step approach for single underwater image enhancement // *Proc. of the International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS)*. 2017. P. 789–794. <https://doi.org/10.1109/ispacs.2017.8266583>
31. Li X., Hou G., Tan L., Liu W. A hybrid framework for underwater image enhancement // *IEEE Access*. 2020. V. 8. P. 197448–197462. <https://doi.org/10.1109/10.1109/ACCESS.2020.3034275>
16. Akkaynak D., Treibitz T. A revised underwater image formation model. *Proc. of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018, pp. 6723–6732. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00703>
17. Pei S.C., Chen C.Y. Underwater images enhancement by revised underwater images formation model. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 108817–108831. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3213340>
18. Mobley C.D., Gentili B., Gordon H.R., Jin Z., Kattawar G.W., Morel A., Reinersman P., Stamnes K., Stavn R.H. Comparison of numerical models for computing underwater light fields. *Applied Optics*, 1993, vol. 32, no. 36, pp. 7484–7504. <https://doi.org/10.1364/AO.32.007484>
19. Semernik I.V., Demyanenko A.V., Samonova C.V., Bender O.V., Tarasenko A. Modelling of an underwater wireless optical communication channel. *Proc. of the Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*, 2023, pp. 468–471. <https://doi.org/10.1109/rsemw58451.2023.10202133>
20. Ramley I., Alzayed H.M., Al-Hadeethi Y., Chen M., Barasheed A.Z. An overview of underwater optical wireless communication channel simulations with a focus on the Monte Carlo method. *Mathematics*, 2024, vol. 12, no. 24, P. 3904. <https://doi.org/10.3390/math12243904>
21. Yang M., Sowmya A. An underwater color image quality evaluation metric. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, vol. 24, no. 12, pp. 6062–6071. <https://doi.org/10.1109/TIP.2015.2491020>
22. Panetta K., Gao C., Agaian S. Human-visual-system-inspired underwater image quality measures. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2016, vol. 41, no. 3, pp. 541–551. <https://doi.org/10.1109/JOE.2015.2469915>
23. Wang S.Q., Ma K.D., Yeganeh H., Wang Z., Lin W. A patch-structure representation method for quality assessment of contrast changed images. *IEEE Signal Processing Letters*, 2015, vol. 22, no. 12, pp. 2387–2390. <https://doi.org/10.1109/LSP.2015.2487369>
24. Semernik I.V. Aquatic environment model for accurate simulation of optical radiation propagation. *KSHP-OMD*, 2024, no. 7. pp. 61–66. (in Russian)
25. Semernik I.V. Modelling optical propagation for image reconstruction in marine mineral exploration. *International Research Journal*, 2024, no. 8 (146), pp. 16. (in Russian). <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.24>
26. Peng L., Zhu C., Bian L. U-Shape transformer for underwater image enhancement. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2023, vol. 32, pp. 3066–3079. <https://doi.org/10.1109/TIP.2023.3276332>
27. Ancuti C., Ancuti C.O., Haber T., Bekaert P. Enhancing underwater images and videos by fusion. *Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2012, pp. 81–88. <https://doi.org/10.1109/cvpr.2012.6247661>
28. Zhang M., Peng J. Underwater image restoration based on a new underwater image formation Model. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 58634–58644. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2875344>
29. Fu X., Zhuang P., Huang Y., Liao Y., Zhang X.-P., Ding X. A Retinex-based enhancing approach for single underwater image. *Proc. of the IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2014, pp. 4572–4576. <https://doi.org/10.1109/icip.2014.7025927>
30. Fu X., Fan Z., Ling M., Huang Y., Ding X. Two-step approach for single underwater image enhancement. *Proc. of the International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS)*, 2017, pp. 789–794. <https://doi.org/10.1109/ispacs.2017.8266583>
31. Li X., Hou G., Tan L., Liu W. A hybrid framework for underwater image enhancement. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 197448–197462. <https://doi.org/10.1109/10.1109/ACCESS.2020.3034275>

Авторы

Семерник Иван Владимирович — кандидат технических наук, главный конструктор, АО «Южморгеология», Геленджик, 353461, Российская Федерация, 55990676800, <https://orcid.org/0000-0002-0238-4154>, ione7nick@yandex.ru

Самонова Кристина Владимировна — кандидат экономических наук, ведущий специалист, АО «Южморгеология», Геленджик, 353461, Российская Федерация, 57194240990, <https://orcid.org/0000-0002-2449-9921>, kristi-rosa@yandex.ru

Authors

Ivan V. Semernik — PhD, Chief Design Engineer, JSC Yuzhmorgeologia, Gelendzhik, 353461, Russian Federation, 55990676800, <https://orcid.org/0000-0002-0238-4154>, ione7nick@yandex.ru

Christina V. Samonova — PhD (Economics), Leading Specialist, JSC Yuzhmorgeologia, Gelendzhik, 353461, Russian Federation, 57194240990, <https://orcid.org/0000-0002-2449-9921>, kristi-rosa@yandex.ru