

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.24>

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ
ИЗОБРАЖЕНИЙ В РАМКАХ МОРСКИХ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ**

Научная статья

Семерник И.В.^{1,*}

¹ ORCID : 0000-0002-0238-4154;

¹ АО «ЮЖМОРГЕОЛОГИЯ», Геленджик, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (ione7nick[at]yandex.ru)

Аннотация

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования распространения оптического излучения в воде с учетом основных физических параметров для оценки коэффициента передачи среды с целью восстановления подводных изображений морского дна, получаемых с применением глубоководных роботизированных комплексов в рамках морских геологоразведочных работ.

Показано, что в связи с применением модели, основанной на численном решении уравнения переноса излучения с помощью метода Монте Карло и учитывающей основные физические параметры водной среды, получаемые результаты обеспечивают высокую точность определения характеристик распространения оптического излучения.

Полученные результаты моделирования для различных параметров водной среды, различных расстояний между объектом съемки (источник) и объективом камеры (приемник) позволят сформировать матрицу корректировки цветов подводного объекта без необходимости использования больших вычислительных мощностей и в режиме реального времени.

Ключевые слова: морские геологоразведочные работы, восстановление подводных изображений, моделирование распространения оптического излучения в воде, подводная фотография, морские роботизированные системы.

**MODELLING OPTICAL PROPAGATION FOR IMAGE RECONSTRUCTION IN MARINE MINERAL
EXPLORATION**

Research article

Semernik I.V.^{1,*}

¹ ORCID : 0000-0002-0238-4154;

¹ JCS Yuzhmorgeologia, Gelendzhik, Russian Federation

* Corresponding author (ione7nick[at]yandex.ru)

Abstract

This work presents the results of numerical modelling of optical radiation propagation in water taking into account the main physical parameters to evaluate the transmission coefficient of the medium in order to reconstruct underwater images of the seafloor obtained with the use of deep-sea robotic systems within the framework of marine mineral exploration.

It is demonstrated that due to the application of the model based on the numerical solution of the radiation transport equation using the Monte Carlo method and taking into account the main physical parameters of the water medium, the results obtained provide high accuracy in determining the characteristics of optical radiation propagation.

The obtained simulation results for different parameters of the aquatic environment, different distances between the imaging object (source) and the camera lens (receiver) will allow to form a matrix of underwater object colour correction without the necessity of using large computing power and in real time.

Keywords: marine mineral exploration, underwater image reconstruction, modelling of optical propagation in water, underwater photography, marine robotic systems.

Введение

Проведение морских геологоразведочных работ по исследованию месторождений железомарганцевых конкреций (ЖМК), кобальтмарганцевых корок (КМК) и глубоководных полиметаллических сульфидов (ГПС) в районах Мирового океана с глубиной до 6000 м осуществляется с помощью специализированного оборудования, осуществляющего гидроакустическую, фото- и видеосъемку морского дна.

Результаты фотосъемки морского дна в дальнейшем обрабатываются и анализируются с целью формирования сведений о рудоносности исследуемого месторождения. Качество съемки оказывает определяющее влияние на эффективность анализа и достоверность выводов. Качество подводной фото- и видеосъемки, в свою очередь, определяется многими факторами, включая особенности освещения, расстояние до объекта съемки, мутность воды и пр., которые приводят к ухудшению контрастности, четкости, яркости фотографий, искажению цвета, появлению дымки [1], [2].

В связи с вышеизложенным разработка методики восстановления подводных изображений [3], [4] с применением современных цифровых интеллектуальных технологий, обеспечивающей минимизацию искажений, вносимых водой и взвешенными в воде частицами, повышение контрастности изображения и восстановление реальных цветов объектов, и ее внедрение в практику геологоразведочных работ повысит их эффективность и достоверность, позволит получить

более точные данные для дальнейшей разработки месторождений твердых полезных ископаемых в различных районах Мирового океана.

Распространение оптического излучения в воде

Распространение оптического излучения в воде определяется в первую очередь такими физическими процессами, как поглощение и рассеяние оптического излучения.

Поглощение – это физический процесс, при котором фотоны теряют свою энергию, которая преобразуется в другие формы, главным образом в тепловую и химическую (фотосинтез).

Рассеяние вызвано вариациями показателя преломления, которые приводят к изменению направления распространения фотонов.

Явления поглощения и рассеяния оптического излучения приводят к появлению трех нежелательных эффектов:

- потери энергии оптического сигнала из-за наличия поглощения, что приводит к уменьшению дальности связи;
- расширение светового луча вследствие рассеяния в совокупности с ограниченной апертурой линзы приемника приводит к уменьшению количества фотонов, достигающих детектора оптического излучения;
- попадание каждого отдельного фотона на чувствительный элемент приемника из-за наличия рассеяния происходит в разные моменты времени (дисперсия), что может привести к межсимвольным искажениям.

Примеры подводных изображений, полученные в ходе морских геологоразведочных работ приведены на рисунке 1.

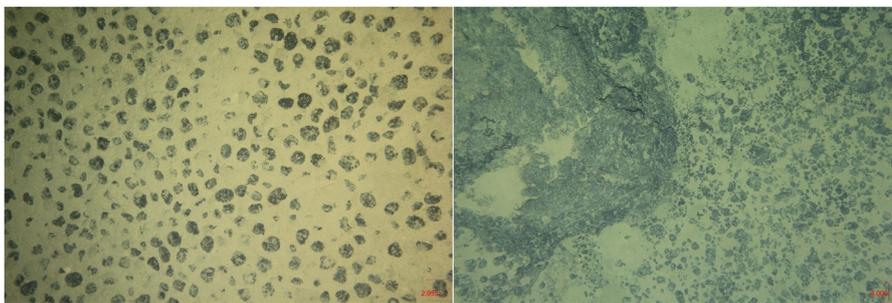


Рисунок 1 - Примеры изображений морского дна, полученные в ходе морских геологоразведочных работ
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.24.1>

Из рисунка 1 видно, что изображениям, полученных в ходе морских геологоразведочных работ, свойственны следующие искажения: изменение цветности, смещение цветов в сине-зеленую область спектра, низкая контрастность изображения, неоднородная освещенность кадра, дымка, наличие взвешенных частиц донных осадков в воде и пр.

Модель водной среды

Наиболее простым способом методом моделирования распространения оптического излучения под водой является использование закона Бера-Ламберта [5]. Однако в этом случае невозможно учесть явления многолучевого распространения, многократного рассеяния, дисперсии оптического сигнала, которые являются очень важными для точной оценки распространения оптического излучения под водой.

Более точным подходом к моделированию подводного оптического канала распространения оптического излучения является решение уравнения переноса излучения (RTE – Radiative transfer equation) [6]. В связи с тем, что уравнение является интегро-дифференциальным с несколькими независимыми переменными [7], то аналитическое решение в общем виде не может быть найдено. В связи с вышеизложенным наиболее широкое распространение получили численные методы решения уравнения переноса излучения [8].

В настоящей работе модель водной среды осуществлено численное решение уравнения переноса излучения с использованием метода Монте Карло [9], который является вероятностным методом, основанным на трассировке распространения большого количества оптических лучей.

Для точного определения параметров модели на этапе инициализации расчетов осуществляется задание длины волны оптического сигнала, глубины расположения канала связи, данные о концентрации хлорофилла в воде, положение и ориентация источника и приемника оптического излучения. На основе введенного значения глубины расположения канала связи определяется значение коэффициента преломления воды, температура и соленость воды.

Для учета рассеяния используется модель, основанная на функции Хеньи-Гринштейна (Henyey-Greenstein), которая имеет параметр «g» – фактор анизотропии, равный 0,9185.

В связи с тем, что в цветовом пространстве RGB цвета изображения могут быть разложены на три основных составляющих (красная, синяя и зеленая), то моделирование необходимо проводить для трех длин волн, соответствующих красной (690 нм), синей (530 нм) и зеленой (485 нм) областям спектра оптического излучения. Изменение интенсивности каждой отдельной составляющей изображения позволяет обеспечить восстановление естественных цветов подводных объектов за счет компенсации повышенного ослабления красного света при распространении под водой.

Результатом моделирования является массив данных, отражающих параметры оптических лучей, достигших точки приема, расположенной на расстоянии 4 м от источника излучения (объекта съемки) (рис. 2, рис. 3, рис. 4). Все оптические лучи излучаются в один момент времени и имеют одинаковую мощность.

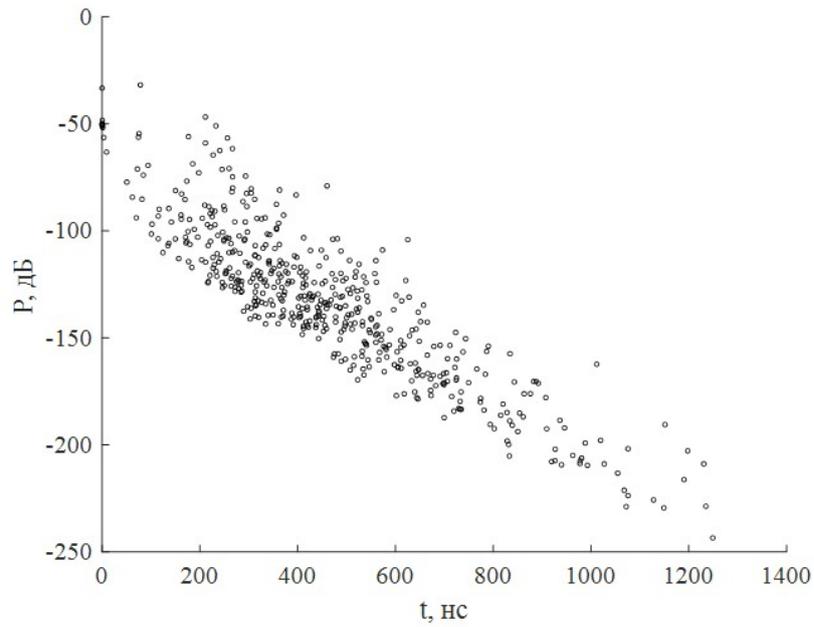


Рисунок 2 - Результаты моделирования распространения оптического излучения с длиной волны 690 нм
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.24.2>

Примечание: красный свет

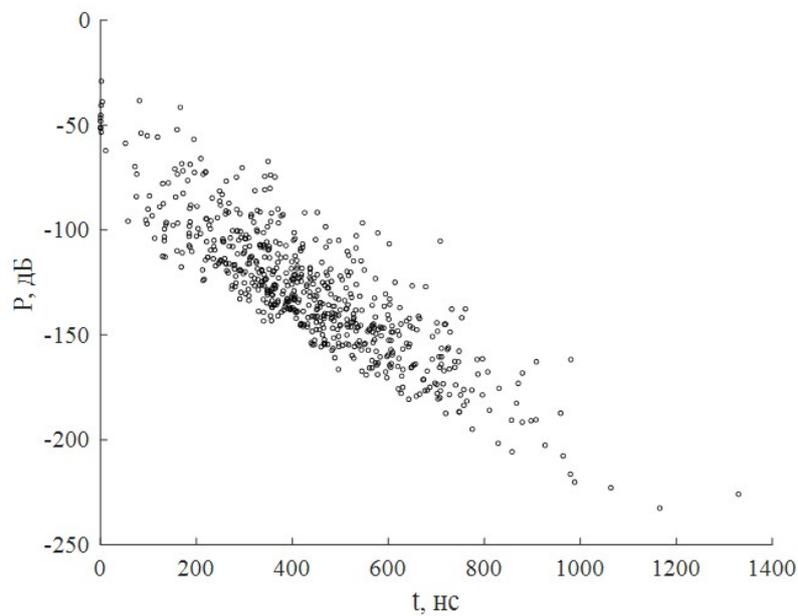


Рисунок 3 - Результаты моделирования распространения оптического излучения с длиной волны 530 нм
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.24.3>

Примечание: зеленый свет

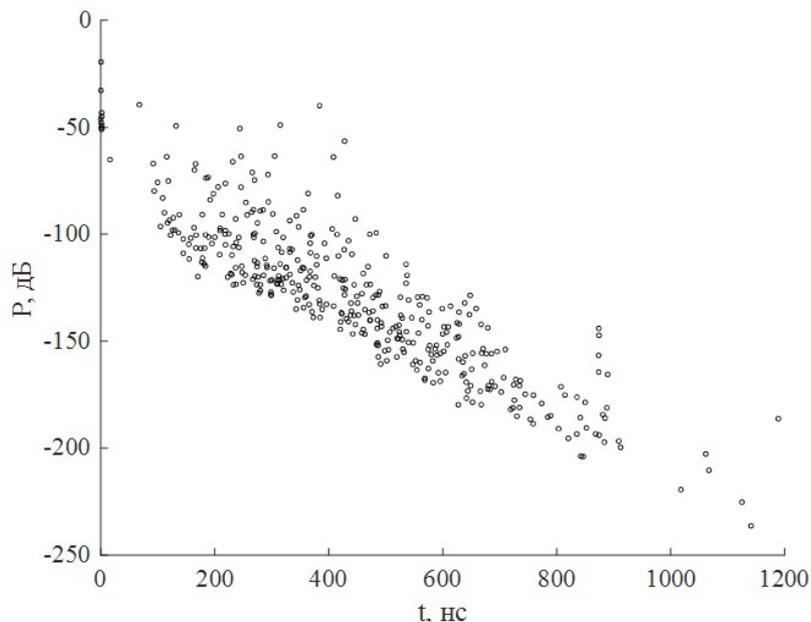


Рисунок 4 - Результаты моделирования распространения оптического излучения с длиной волны 485 нм
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.24.4>

Примечание: синий свет

На рисунках 2–4 каждая отдельная точка характеризует отдельный достигший точки расположения приемника оптический луч, распространение которого промоделировано с помощью метода Монте Карло.

На рисунках 5–7 показаны гистограммы распределения оптических лучей по времени прихода в точку приема.

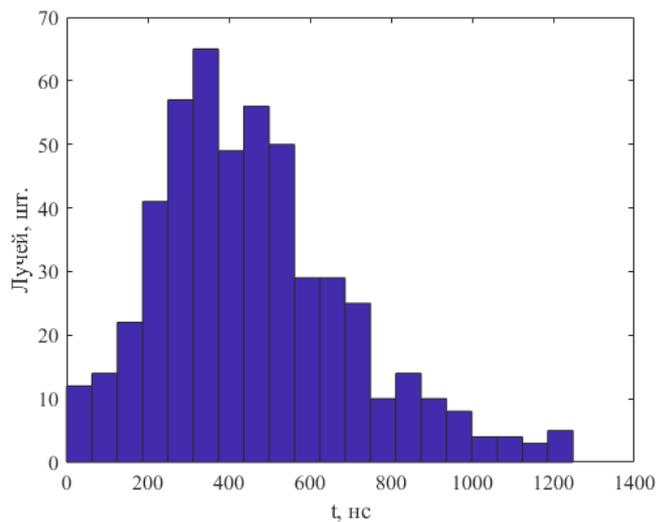


Рисунок 5 - Гистограмма распределения оптических лучей по времени прихода в точку приема для длины волны 690 нм
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.24.5>

Примечание: красный свет

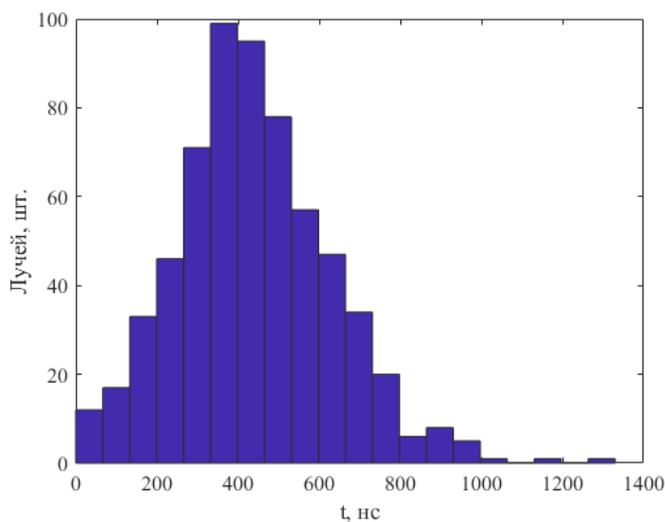


Рисунок 6 - Гистограмма распределения оптических лучей по времени прихода в точку приема для длины волны 530 нм

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.24.6>

Примечание: зеленый свет

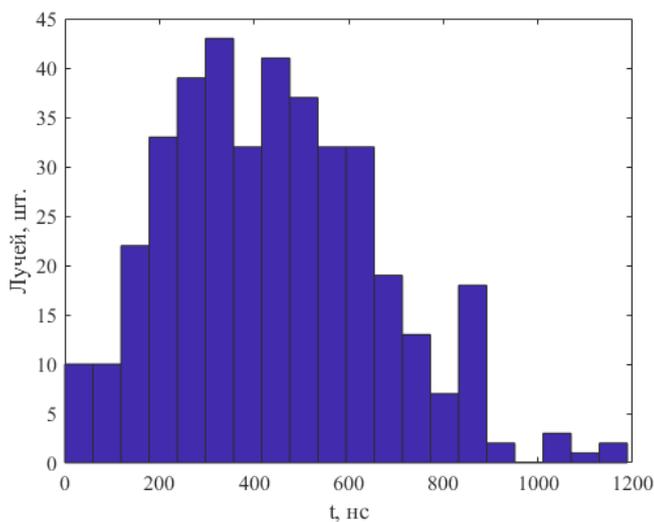


Рисунок 7 - Гистограмма распределения оптических лучей по времени прихода в точку приема для длины волны 485 нм

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.24.7>

Примечание: синий свет

Из результатов моделирования видно, что несмотря на то, что распространение всех лучей берет начало в один и тот же момент времени, из-за наличия рассеяния в канале связи наблюдается существенный разброс моментов достижения лучами точки расположения приемника. При этом мощность поступающих на вход приемника лучей стремительно спадает с ростом времени прихода луча из-за его многократного рассеяния в процессе распространения в канале связи. Для красного света выше как уровень затухания оптического излучения, так и величина рассеяния, что приводит к значительному ослаблению оптического излучения с длиной волны, соответствующей красному цвету. Данный эффект проявляется в подводной съемке в виде искажения цветов объектов и смещении палитры изображения в область сине-зеленого цвета.

Заключение

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования распространения оптического излучения через водную среду для оценки коэффициента передачи среды с целью восстановления цветности подводных изображений морского дна, получаемых с применением глубоководных роботизированных комплексов в рамках морских геологоразведочных работ.

В связи с применением модели, основанной на численном решении уравнения переноса излучения с помощью метода Монте Карло и учитывающей основные физические параметры водной среды, получаемые результаты обеспечивают повышенную точность определения характеристик распространения оптического излучения.

Полученные результаты моделирования для различных параметров водной среды, различных расстояний между объектом съемки (источник) и объективом камеры (приемник) позволят сформировать матрицу коррективы цветов подводного объекта без необходимости использования больших вычислительных мощностей и в режиме реального времени.

Финансирование

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

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-79-01253, <https://rscf.ru/project/23-79-01253/>.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Zhou Jc. Classical and state-of-the-art approaches for underwater image defogging: a comprehensive survey / Jc. Zhou, Dh. Zhang, Ws. Zhang // *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*. — 2020. — Vol. 21. — P. 1745–1769.
2. Zhang W. A Survey of Restoration and Enhancement for Underwater Images / W. Zhang, L. Dong, X. Pan [et al.] // *IEEE Access*. — 2019. — Vol. 7. — P. 182259–182279.
3. Zhang T. Underwater Optical Image Restoration Method for Natural/Artificial Light / T. Zhang, Q. Li, Y. Li [et al.] // *J. Mar. Sci. Eng.* — 2023. — № 11. — P. 470.
4. Wang Y. An Experimental-Based Review of Image Enhancement and Image Restoration Methods for Underwater Imaging / Y. Wang, W. Song, G. Fortino [et al.] // *IEEE Access*. — 2019. — Vol. 7. — P. 140233–140251.
5. Smart J. Underwater optical communications systems part 1: variability of water optical parameters / J. Smart // *Proc. IEEE Military Communications Conference (MILCOM'05)*. — Atlantic City, 2005. — P. 1140–1146.
6. Arnon S. *Advanced Optical Wireless Communication Systems* / S. Arnon, J. Barry, G. Karagiannidis [et al.]. — New York, 2012.
7. Li C. Alouini. A direct radiative transfer equation solver for path loss calculation of underwater optical wireless channels / C. Li, K.-H. Park, M.-S. Alouini // *CEMSE division*. — KAUST. — 2014. — P. 333892.
8. Mobley C. D. Comparison of numerical models for computing underwater light fields / C. D. Mobley, B. Gentili, H. R. Gordon [et al.] // *Applied Optics*. — 1993. — Vol. 32. — P. 7484–7504.
9. Lerner R. M. Monte Carlo description of time- and space-resolved multiple forward scatter in natural water / R. M. Lerner, J. D. Summers // *Applied Optics*. — 1982. — Vol. 21. — P. 861–869.
10. Li J. Channel capacity study of underwater wireless optical communications links based on monte carlo simulation / J. Li, Y. Ma, Q. Zhou [et al.] // *Journal of Optics*. — 2011. — Vol. 14. — P. 015403.