

## Статистическое моделирование характеристик подводной оптической связи на рассеянном излучении

М.В. Тарасенков, В.В. Белов, Е.С. Познахарев\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 5.12.2018 г.; после доработки 25.02.2019 г.

С помощью алгоритма модифицированной двойной локальной оценки метода Монте-Карло моделируются импульсные реакции подводного канала связи вне прямой видимости на рассеянном излучении для базовых расстояний между источником и приемником от 10 до 100 м на длине волны 0,5 мкм. На их основе оценены мощности принимаемого излучения и максимальные скорости передачи информации.

*Ключевые слова:* подводная связь, канал связи на рассеянном излучении вне прямой видимости, метод Монте-Карло; underwater optical communication, NLOS diffuse link, Monte-Carlo method.

### Введение

Связь в водной среде может осуществляться не только в акустическом, но и в оптическом диапазоне длин волн [1]. Основными преимуществами оптической связи являются более высокая скорость передачи информации и отсутствие фонового излучения канала (при работе на большой глубине). Для некоторых приложений ее достоинством становится небольшая предельная дистанция передачи информации (не более 100–200 м). Оптические свойства водных сред изменяются в широких пределах. Поэтому можно предполагать существенную зависимость реализуемости и качества этой связи от конкретных характеристик водной среды.

Существует достаточно много работ, посвященных подводной оптической связи [1–17]. Их можно разделить на 4 группы:

- 1) подводная оптическая связь в пределах прямой видимости [1–13];
- 2) оптическая связь в пределах прямой видимости через границу раздела атмосфера–море [14];
- 3) подводная оптическая связь вне прямой видимости на излучении, отраженном от границы раздела атмосфера–море [1–3, 15];
- 4) подводная оптическая связь вне прямой видимости на рассеянном в водной среде излучении [16, 17].

Оптическую связь вне прямой видимости на рассеянном излучении в отечественной литературе называют бистатической, в зарубежной – NLOS (Non-Line-Of-Sight) связью. Для схемы связи в пределах

прямой видимости в работе [3] оценено качество подводного канала связи и, в частности, показано, что предельная частота следования импульсов, которые могут быть приняты без искажений, составляет  $1 \cdot 10^8$  Гц. Будем далее для краткости называть эту характеристику предельной частотной характеристикой канала связи. Для схемы связи с полным внутренним отражением в [3] эта характеристика оценивается на уровне  $2 \cdot 10^7$  Гц. Что касается связи вне прямой видимости на рассеянном излучении, то она остается недостаточно изученной. В немногочисленных публикациях (например, [16, 17]) приведены результаты расчетов импульсных реакций каналов подводной связи для нескольких частных случаев.

В Институте оптики атмосферы СО РАН выполняются экспериментальные работы по исследованию возможностей подводной оптической связи для бистатической схемы формирования канала связи [18]. Параллельно ведутся теоретические исследования каналов атмосферной и подводной NLOS-связи. В подавляющем большинстве теоретических работ по подводной оптической связи используется либо метод Монте-Карло прямого моделирования, либо приближение однократного рассеяния. Однако для связи на рассеянном излучении вне прямой видимости при больших базовых расстояниях и малых углах расходимости излучения источника и поля зрения приемника метод Монте-Карло прямого моделирования практически не пригоден. Что касается приближения однократного рассеяния, оно не подходит для моделирования импульсной реакции в ближней и дальней временных зонах, а также в центральной зоне при значительной удаленности источника от приемника.

Для решения подобных задач в СО РАН под руководством Г.И. Марчука и Г.А. Михайлова были

\* Михаил Викторович Тарасенков (tmv@iao.ru); Владимир Васильевич Белов (belov@iao.ru); Егор Сергеевич Познахарев.

разработаны алгоритмы метода Монте-Карло с локальными и двойными локальными оценками из точек «столкновения» фотонов со средой [19]. В первой нашей работе [20], посвященной бистатистической атмосферной связи, использовался алгоритм метода Монте-Карло локальной оценки. Анализ полученных результатов показал низкую эффективность этого алгоритма для подобных задач. В связи с этим в [21, 22] был предложен алгоритм модифицированной двойной локальной оценки, который в [23] был успешно применен для моделирования импульсной реакции атмосферного канала связи. В настоящей работе рассматриваются результаты статистического моделирования предлагаемым алгоритмом характеристик NLOS-канала подводной оптической связи для частного случая глубины видимости в 30 м. Измеренные экспериментально оптические параметры водной среды можно найти в [24–26]. Рассматриваемая далее оптическая модель имеет меньшее ослабление излучения, чем в [24–26].

Цель данной работы – оценка сверху потенциальных возможностей подводного канала связи в условиях водной среды с высокой прозрачностью.

## Постановка задачи

Задача рассматривается в следующей постановке (рис. 1). На некоторой глубине  $L$  (достаточно удаленной от границы раздела атмосфера–море, чтобы влияние волнения моря на результат было пренебрежимо мало) находится лазерный импульсный источник излучения с углом расходимости  $\nu_0$ , ось источника располагается горизонтально и ориентирована в направлении, задаваемом углом  $\theta_0$ . Если влияние границы раздела существенно, то в рассматриваемую модель требуется добавить модель границы раздела атмосфера–море [27]. Такие ситуации в настоящей работе не рассматриваются. Мощность источника от времени меняется как  $P_0(t)$ . На базовом расстоянии от источника  $Y_N$  на той же глубине  $L$  располагается приемник с углом поля зрения  $\nu_d$ , ориентированный горизонтально в направлении, задаваемом углом  $\theta_d$ . Для заданных оптико-геометрических условий и характеристик приемопередающей аппаратуры требуется оценить качество канала связи и предельную частоту передачи импульсов.

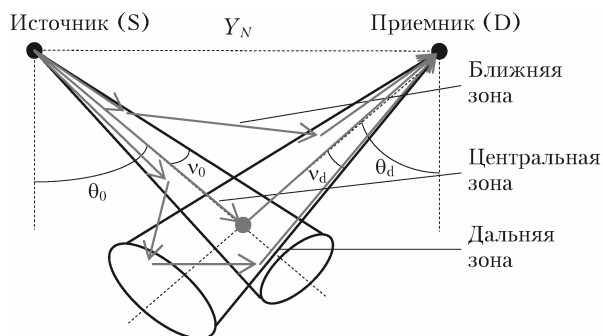


Рис. 1. Схема формирования канала подводной оптической связи (вид сверху)

Для ситуаций, когда мощность лазерного излучения такова, что нелинейные эффекты пренебрежимо малы, мощность принимаемого излучения может быть определена по формуле

$$P(t) = S_d \int_0^{\infty} P_0(t') h(t-t') dt' = S_d p(t), \quad (1)$$

где  $h$  – импульсная реакция канала связи;  $S_d$  – площадь апертуры приемной системы;  $p(t)$  – мощность принимаемого излучения на единицу площади приемной апертуры.

Таким образом, для определения реакции водной среды на произвольный входной импульс достаточно знать реакцию среды на входной  $\delta(t)$ -импульс – импульсную реакцию, которая моделировалась на конечном числе временных интервалов. Для каждого частного случая определялось время, соответствующее верхней границе ближней временной зоны  $[0, t_1]$  и центральной временной зоне  $[t_1, t_2]$ . Границы дальней временной зоны задавались равными  $[t_2, t_{\max}]$ , где  $t_{\max} = 5t_2$ , что, как показали расчеты, достаточно для решения рассматриваемой задачи. Максимальная длина траекторий с учетом базового расстояния  $l_{\max} = t_{\max} \cdot c$  ( $c$  – скорость света). Ближняя временная зона разбивалась на  $N_1$ , центральная –  $N_2$ , а дальняя –  $N_3$  одинаковых временных интервалов.

Оптическая модель водной среды задавалась на основе работ [28–30]. Входными параметрами модели являлись длина волны  $\lambda$  и глубина видимости  $z_w$ . Оптические коэффициенты водной среды задавались соотношениями

$$\sigma_t = \sigma_{s,s} + \sigma_{s,l} + \sigma_{s,w} + \sigma_a, \quad (2)$$

$$\sigma_{s,s} = 1,34 \cdot v_s \left( \frac{0,55}{\lambda} \right)^{1,7}, \quad (3)$$

$$\sigma_{s,l} = 0,312 \cdot v_l \left( \frac{0,55}{\lambda} \right)^{0,3}, \quad (4)$$

$$\sigma_{s,w} = 1,7 \cdot 10^{-3} \left( \frac{0,55}{\lambda} \right)^{4,3}, \quad (5)$$

$$\sigma_a = 1,5 \cdot \frac{B(\lambda)}{z_w} + A(\lambda), \quad (6)$$

где  $\sigma_t$  – коэффициент ослабления;  $\sigma_{s,s}$  – коэффициент рассеяния мелкой взвесью;  $\sigma_{s,l}$  – коэффициент рассеяния крупной взвесью;  $\sigma_{s,w}$  – коэффициент рассеяния чистой водой;  $\sigma_a$  – коэффициент поглощения;  $v_s$  – объемная концентрация мелкой взвеси;  $v_l$  – объемная концентрация крупной взвеси;  $B(\lambda)$  – эмпирические константы.

Значения оптических параметров морской воды для глубины видимости  $z_w = 30$  м и  $\lambda = 0,5$  мкм приведены в таблице. Индикатрисы рассеяния чистой воды  $g_w$ , мелкой взвеси  $g_s$  и крупной взвеси  $g_l$  как функции угла рассеяния  $\gamma$  показаны на рис. 2 [28–30].

Оптические параметры водной среды  
при  $z_w = 30$  м и  $\lambda = 0,5$  мкм

Параметр	Значение	Параметр	Значение
$A, \text{M}^{-1}$	0,003	$\sigma_{s, w}, \text{M}^{-1}$	0,003
$B$	0,800	$\sigma_{a, s}, \text{M}^{-1}$	0,043
$\sigma_{s, l}, \text{M}^{-1}$	0,120	$\sigma_{t, s}, \text{M}^{-1}$	0,277
$\sigma_{s, s}, \text{M}^{-1}$	0,112		

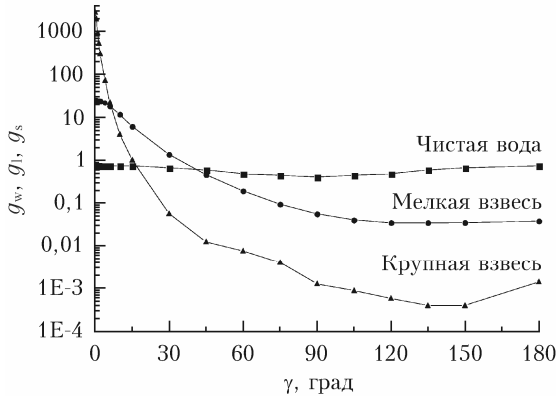


Рис. 2. Индикатрисы молекулярного рассеяния чистой морской воды, гидрозолевого рассеяния крупной и мелкой взвеси

## Результаты статистического моделирования

Расчеты импульсной реакции канала подводной оптической связи на рассеянном излучении выполнялись для следующих оптико-геометрических условий:  $\lambda = 0,5$  мкм;  $z_w = 30$  м;  $Y_N = 10; 20; 30; 40; 50; 100$  м;  $\theta_0 = 0; 30; 45; 85^\circ$ ;  $\theta_d = 30; 45; 85^\circ$ ;  $\nu_0 = 0,0034^\circ$ ;  $\nu_d = 2^\circ$ ;  $N_1 = 5$ ;  $N_2 = 5$ ;  $N_3 = 15$ . Для каждой рассматриваемой ситуации моделировалось 30 пакетов по  $10^8$  траекторий (всего  $3 \cdot 10^9$  траекторий). Примеры результатов расчетов импульсной реакции приведены на рис. 3.

Зная характеристики приемопередающей аппаратуры и импульсную реакцию атмосферного канала, можно оценить качество канала связи. Рассмотрим параметр (следуя [31]):

$$\eta = 10 \lg(P_0/P) = 10 \lg(P_0/p_d S_d), \quad (7)$$

который описывает уменьшение мощности принимаемого излучения по сравнению с мощностью источника;  $p_d$  — значение мощности принимаемого излучения на единицу площади апертуры. В качестве  $p_d$  в расчетах бралось максимальное значение мощности принимаемого излучения на единицу площади апертуры.

Для определенности предположим, что форма лазерного импульса источника прямоугольная, его длительность  $\Delta t = 30$  нс,  $P_0 = 1$  Вт. Площадь апертуры приемника примем равной  $0,01 \text{ м}^2$ . Тогда, зная импульсные реакции, по формулам (1), (7) можно оценить, насколько уменьшится мощность принимаемого излучения по сравнению с мощностью источника при заданных оптико-геометрических условиях.

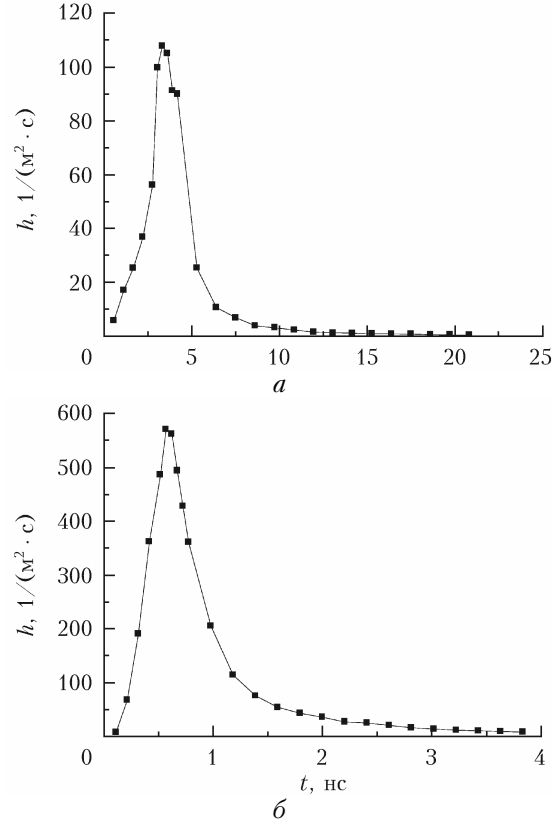


Рис. 3. Импульсные реакции подводного бистатического канала связи: а —  $Y_N = 20$  м,  $\theta_0 = 30^\circ$ ,  $\theta_d = 85^\circ$ ; б —  $Y_N = 50$  м,  $\theta_0 = 85^\circ$ ,  $\theta_d = 85^\circ$

Результаты расчетов приведены на рис. 4. Средняя погрешность полученных результатов равна  $0,05$  дБ, максимальная —  $0,19$  дБ. Эти результаты показывают, что оптимальной с точки зрения мощности принимаемого излучения является схема с наибольшими значениями  $\theta_0$  и  $\theta_d$ . Величина  $\eta$  для базовых расстояний от 10 до 100 м лежит в пределах  $50$ – $150$  дБ.

Другой фактор, характеризующий качество канала связи, — предельная импульсная характеристика  $\nu_{\max}$ . Следуя работе [31], в качестве предельной частоты между импульсами, которую пропускает канал связи, возьмем величину  $\nu_{\max}$ , определяемую как

$$\frac{F[P(t)](\nu_{\max})}{F[P(t)](0)} = 0,5, \quad (8)$$

$$F[P(t)](\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} P(t) e^{2\pi i \nu t} dt, \quad (9)$$

где  $F$  — преобразование Фурье.

Для оптико-геометрических условий и характеристик приемопередающей аппаратуры, описанных выше, были вычислены предельные частоты  $\nu_{\max}$ . Результаты расчетов приведены на рис. 5. Анализ результатов показывает, что для базовых расстояний  $Y_N$  от 10 до 100 м при длительности импульса источника в 30 нс  $\nu_{\max}$  лежит в пределах от  $2 \cdot 10^7$  Гц.

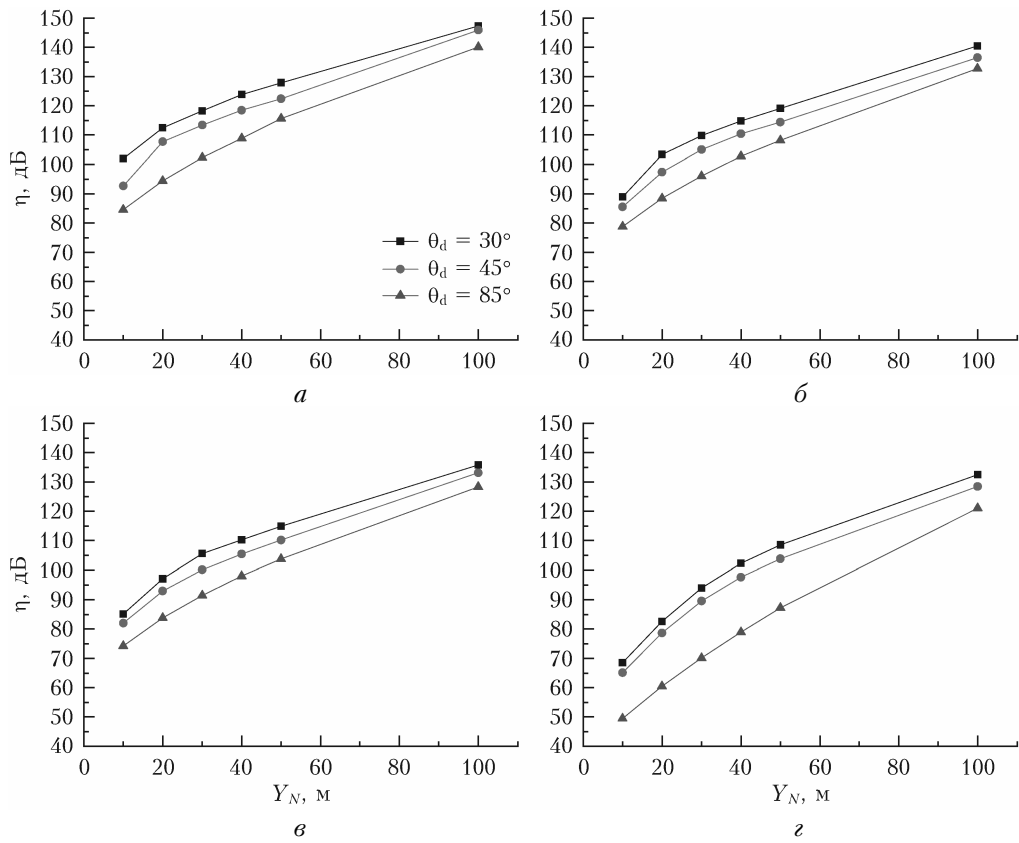


Рис. 4. Зависимость  $\eta$  от  $Y_N$  для  $\theta_0 = 0$  (а);  $30^\circ$  (б);  $45^\circ$  (в);  $85^\circ$  (г)

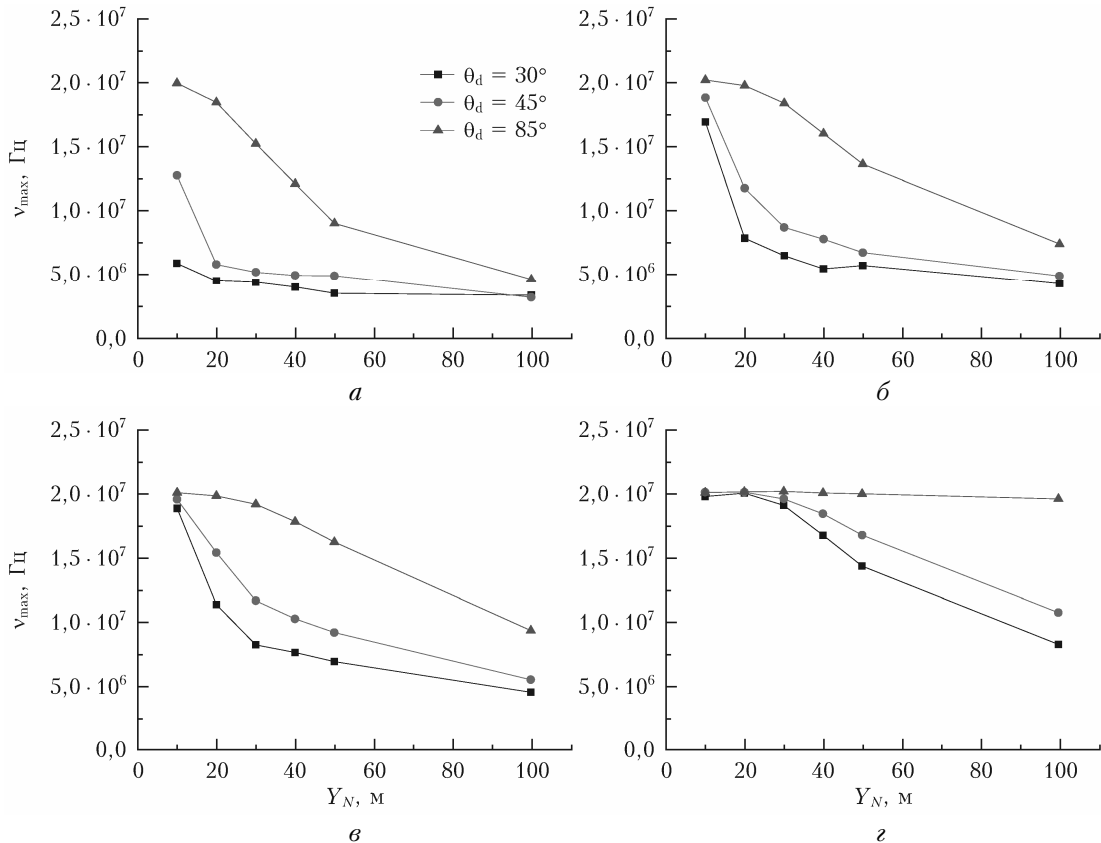


Рис. 5. Зависимость  $v_{\max}$  от  $Y_N$  для  $\theta_0 = 0$  (а);  $30^\circ$  (б);  $45^\circ$  (в);  $85^\circ$  (г)

## Заключение

Проведенные расчеты для подводного канала оптической связи вне прямой видимости на рассеянном излучении показали, что для осуществления связи на длине волны  $\lambda = 0,5$  мкм при глубине видимости  $z_w = 30$  м на базовых расстояниях 10–100 м и широком наборе направлений ориентаций оптических осей источника и приемной системы необходимо, чтобы предельная мощность излучения, регистрируемая приемником, отличалась от мощности источника на  $\eta = 150$  дБ и более. В этом случае максимальное количество передаваемых импульсов  $V_{max}$  будет лежать в пределах от  $3 \cdot 10^6$  до  $2 \cdot 10^7$  Гц при длительности отдельных импульсов, генерируемых источником,  $\Delta t = 30$  нс.

1. *Kaushal H., Kaddoum G.* Underwater Optical Wireless Communication // IEEE ACCESS. 2016. V. 4. P. 1518–1547.
2. *Arnon S., Kedar D.* Non-line-of-sight underwater optical wireless communication network // J. Opt. Soc. Am. A. 2009. V. 26, N 3. P. 530–539.
3. *Jasman F., Green R.J.* Monte Carlo Simulation for Underwater Optical Wireless Communications // Proc. 2013 2nd Intern. Workshop on Opt. Wireless Commun. 2013. P. 113–117.
4. *Li J., Ma Y., Zhou Q., Zhou B., Wang H.* Channel capacity study of underwater wireless optical communications links based on Monte Carlo simulation // J. Opt. 2012. V. 14, N 1. P. 1–7.
5. *Jaruwatanadilok S.* Underwater Wireless Optical Communication Channel Modeling and Performance Evaluation using Vector Radiative Transfer Theory // IEE J. Select. Areas Commun. 2008. V. 26, N 9. P. 1620–1627.
6. *Hanson F., Radic S.* High bandwidth underwater optical communication // Appl. Opt. 2008. V. 47, N 2. P. 277–283.
7. *Gabriel C., Khalighi M.A., Bourennane S., Leon P., Rigaud V.* Monte-Carlo-Based Channel Characterization for Underwater Optical Communication Systems // J. Opt. Commun. Netw. 2013. V. 5, N 1. P. 1–12.
8. *Gabriel C., Khalighi M.A., Bourennane S., Leon P., Rigaud V.* Channel Modeling for Underwater Optical Communication // 2011 IEEE Globecom Workshops. 2011. P. 833–837.
9. *Doniec M., Detweiler C., Vasilescu I., Rus D.* Using Optical Communication for Remote Underwater Robot Operation // IEEE/RSJ 2010 Intern. Conf. Intelligent Robots and Systems. 2010. P. 4017–4022.
10. *Neuner B., Pascoguin B.M.* A novel method to optimize the wavelength for underwater free-space optical communications // Proc. SPIE. 2014. V. 9224, N 922417. P. 1–8.
11. *Dalgleish F.R., Shirron J.J., Rashkin D., Giddings T.E., Dalgleish A.K.V., Cardei I., Ouyang B., Caimi F.M., Cardei M.* Physical layer simulator for undersea free-space laser communications // Opt. Eng. 2014. V. 53(5), N 051410. P. 1–14.
12. *Tian B., Zhang F., Tan X.* Design and Development of an LED-based Optical Communication System for Autonomous Underwater Robots // 2013 IEEE/ASME Intern. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics: Mechatronics for Human Wellbeing. 2013. P. 1558–1563.
13. *Tang S., Dong Y., Zhang X.* Impulse Response Modeling for Underwater Wireless Optical Communication Links // IEEE Trans. Commun. 2014. V. 62, N 1. P. 226–234.
14. *Majumdar A.K., Siegenthaler J., Land P.* Analysis of Optical Communications through the Random Air-Water interface: Feasibility for Under-Water Communications // Proc. SPIE. 2012. V. 8517, N 85170T. P. 1–13.
15. *Doniec M., Angermann M., Rus D.* An End-to-End Signal Strength Model for Underwater Optical Communications // IEEE J. Oceanic Eng. 2013. V. 38, N 4. P. 743–757.
16. *Choudhary A., Jagadeesh V.K., Muthuchidambaranathan P.* Path loss analysis of NLOS Underwater Wireless Optical Communication channel // 2014 Intern. Conf. on Electronics and Commun. Systems. 2014. P. 1–4.
17. *Jagadeesh V.K., Choudhary A., Bui F.M., Muthuchidambaranathan P.* Characterization of Channel Impulse Responses for NLOS Underwater Wireless Optical Communications // 2014 Fourth Intern. Conf. on Advances in Computing and Communications. 2014. P. 77–79.
18. *Белов В.В., Абрамочкин В.Н., Гриднев Ю.В., Кудрявцев А.Н., Тарасенков М.В., Федосов А.В.* Оптико-электронные бистатические коммуникационные системы. Полевые эксперименты на искусственном и естественном водоемах // Оптика атмосфер. и океана. 2017. Т. 30, № 1. С. 82–87; *Белов В.В., Абрамочкин В.Н., Гриднев Ю.В., Кудрявцев А.Н., Тарасенков М.В., Федосов А.В.* Bistatic optoelectronic communication systems: Field experiments in artificial and natural water reservoirs // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 4. P. 366–371.
19. *Марчук Г.И., Михайлов Г.А., Назаралиев М.А., Дарбинян Р.А., Каргин Б.А., Елепов Б.С.* Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-е, 1976. 284 с.
20. *Белов В.В., Тарасенков М.В., Абрамочкин В.Н., Иванов В.В., Федосов А.В., Троицкий В.О., Шиянов Д.В.* Атмосферные бистатические каналы связи с рассеянием. Часть 1. Методы исследования // Оптика атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 4. С. 261–267; *Белов В.В., Тарасенков М.В., Абрамочкин В.Н., Иванов В.В., Федосов А.В., Троицкий В.О., Шиянов Д.В.* Atmospheric bistatic communication channels with scattering. Part 1. Methods of study // Atmos. Ocean. Opt. 2013. V. 26, N 5. P. 364–370.
21. *Белов В.В., Тарасенков М.В.* Три алгоритма статистического моделирования в задачах оптической связи на рассеянном излучении и бистатического зондирования // Оптика атмосфер. и океана. 2016. Т. 29, № 5. С. 397–403; *Белов В.В., Тарасенков М.В.* Three algorithms of statistical modeling in problems of optical communication on scattered radiation and bistatic sensing // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 6. P. 533–540.
22. *Тарасенков М.В., Белов В.В.* Сравнение трудоемкости алгоритмов статистического моделирования импульсной реакции канала бистатической лазерной связи на рассеянном излучении и бистатического лазерного зондирования // Вычисл. технол. 2017. Т. 22, № 3. С. 91–102.
23. *Тарасенков М.В., Белов В.В., Познахареv Е.С.* Моделирование процесса передачи информации по атмосферным каналам распространения рассеянного лазерного излучения // Оптика атмосфер. и океана. 2017. Т. 30, № 5. С. 371–376; *Тарасенков М.В., Белов В.В., Познахареv Е.С.* Simulation of information transfer through atmospheric channels of scattered laser radiation propagation // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 5. P. 412–416.
24. *Акулова О.Б., Букатый В.И., Суторихин И.А.* Влияние компонентов природной воды на спектральный

- показатель ослабления света (на примере водоемов Алтайского края) // *Оптика атмосфер. и океана*. 2017. Т. 30, № 5, С. 414–419.
25. *Кукушкин А.С.* Пространственно-временная изменчивость распределения прозрачности вод в северо-западной части Черного моря // *Оптика атмосфер. и океана*. 2017. Т. 30, № 9. С. 750–762.
  26. *Ростовцева В.В., Гончаренко И.В., Коновалов Б.В., Алюкаева А.Ф.* Оперативная оценка состояния прибрежных морских акваторий по данным пассивного оптического зондирования поверхности воды с борта судна // *Оптика атмосфер. и океана*. 2017. Т. 30, № 12. С. 1017–1022; *Rostovtseva V.V., Goncharenko I.V., Konovalev B.V., Alukaeva A.F.* Rapid estimation of the ecological state of coastal water areas based on shipboard passive remote optical sensing of the water surface // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 3. P. 225–232.
  27. *Запезалов А.С.* Определение статистических моментов уклонов морской поверхности оптическими сканерами // *Оптика атмосфер. и океана*. 2017. Т. 30, № 9. С. 789–793; *Zapevalov A.S.* Determination of the statistical moments of sea-surface slopes by optical scanners // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 1. P. 91–95.
  28. *Оптика океана и атмосферы* / под ред. К.С. Шифрина. М.: Наука, 1981. 231 с.
  29. *Оптика океана*. Т. 1. Физическая оптика океана / под ред. А.С. Монины. М.: Наука, 1983. 372 с.
  30. *Оптика океана*. Т. 2. Прикладная оптика океана / под ред. А.С. Монины. М.: Наука, 1983. 236 с.
  31. *Haipeng D., Chen G., Arun K., Sadler B.M., Xu Z.* Modeling of non-line-of-sight ultraviolet scattering channels for communication // *IEEE J. Select. Areas Commun.* 2009. V. 27, N 9. P. 1535–1544.

*M.V. Tarasenkov, V.V. Belov, E.S. Poznakharev.* **Statistical simulation of the characteristics of diffuse underwater optical communication.**

Using an algorithm of the Monte Carlo method with modified double local estimation, the impulse response of the link of non-line-of-site underwater communication on scattered radiation is simulated for base distances between the source and the receiver from 10 to 100 m at a wavelength of 0.5  $\mu\text{m}$ . The received radiation power and the maximal repetition frequency of pulses transmitted through the communication link are estimated based on the impulse response.