

УДК 621.391.63

EDN [QLHAEQ](#)



<https://www.doi.org/10.47813/nto.4.2023.10.265-274>

Применение оптических каналов связи между поисковыми подводными аппаратами в рамках экологического мониторинга состояния морского дна

Ю.Г. Ксенофонов

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, Российская Федерация

E-mail: ksenofontov.ura@mail.ru

Аннотация. Благодаря современным подводным методам исследования состояния дна удалось достичь значительных успехов в обнаружении и идентификации вредных и опасных объектов. Так как на сегодняшний день в рамках экологического мониторинга все чаще привлекаются поисковые подводные аппараты (ПА), ученые совместно с отечественными научно-производственными платформами начали проводить работы по формированию системы телекоммуникационного поля с целью высокоскоростной передачи данных с подводных аппаратов в единый координационный центр. Сами же аппараты оснащены специальными телевизионными камерами, при помощи которых непосредственно осуществляется визуализация объектов. Ввиду того, что поисковые системы должны функционировать в режиме реального времени, необходимо иметь высокоскоростную сеть передачи данных. Это становится возможным при помощи лазерных технологий, на базе которых реализуется подводная беспроводная оптическая связь (UWOC). В статье предлагается использовать новые связи UWOC, основанные на полном отражении на границе раздела воздух-вода (NLOS), что поможет в какой-то мере снизить влияние данных природных составляющих. В работе представлены примеры линии связи, максимальная скорость передачи данных которой достигает 300 Мбит/с коэффициентом битовых ошибок BER $3,10 \cdot 10^{-3}$ при условии их прямого полного отражения с углом 7° . Здесь же приведены оценки производительности всей UWOC на основе полного отражения на границе раздела воздух-вода и влияния на качество связи UWOC при изменении частоты и амплитуды волн.

Ключевые слова: экологический мониторинг, поисковые подводные аппараты, лазерные технологии, подводная беспроводная оптическая связь, микро-светодиод, граница раздела воздух-вода.

Use of optical communication channels between search underwater vehicles within the framework of environmental monitoring of the seabed condition

Y.G. Ksenofontov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Dvinskaya 5/7, St. Petersburg, 198035, Russian Federation

E-mail: ksenofontov.ura@mail.ru

Abstract. Thanks to modern underwater methods for studying the state of the bottom, significant success was achieved in detecting and identifying harmful and dangerous objects. Since today, within the framework of environmental monitoring, search underwater vehicles are increasingly involved, scientists, together with domestic research and production platforms, began to work on the formation of a telecommunications field system with the aim of high-speed data transfer from underwater vehicles to a single coordination center. The devices themselves are equipped with special television cameras, with the help of which the visualization of objects is directly carried out. Due to the fact that search engines must operate in real time, it is necessary to have a high-speed data network. This is possible using laser technologies, on the basis of which underwater wireless optical communication (UWOC) is implemented. The article proposes using new UWOC links based on full air-water interface (NLOS) reflection, which will help to reduce the impact of these natural constituents to some extent. This provides examples of a link with a maximum data rate of up to 300 Mbit/s BER bit error rate $3,10 \cdot 10^{-3}$ provided that they are directly reflected completely at an angle of 7° . It also provides performance estimates of the entire UWOC based on the total reflection at the air-water interface and the effect on the quality of UWOC communication when changing the frequency and amplitude of the waves.

Keywords: environmental monitoring, search underwater vehicles, laser technologies, underwater wireless optical communication, micro-LED, air-water interface.

1. Введение

В связи с высокой интенсивностью освоения арктической зоны Российской Федерации остро встает вопрос обеспечения требуемого уровня экологической обстановки в регионе, в том числе, и в водной среде. Большая роль в процессе проведения экологического мониторинга отводится поисковым подводным аппаратам (ПА), способным обнаруживать и идентифицировать объекты на морском дне, представляющие определенную опасность (рис. 1) [1]. При этом, ПА должны оперативно передавать в координационный центр информацию о наличии загрязняющих водную среду предметов и веществ. Для этого необходимо вводить в работу современные телекоммуникационные системы, имеющие высокие пропускную способность и скорость передачи данных [2, 3]. С этой задачей определенно может справиться так называемая подводная беспроводная оптическая связь (UWOC), которая использует оптический канал, основанный на лазерных технологиях.

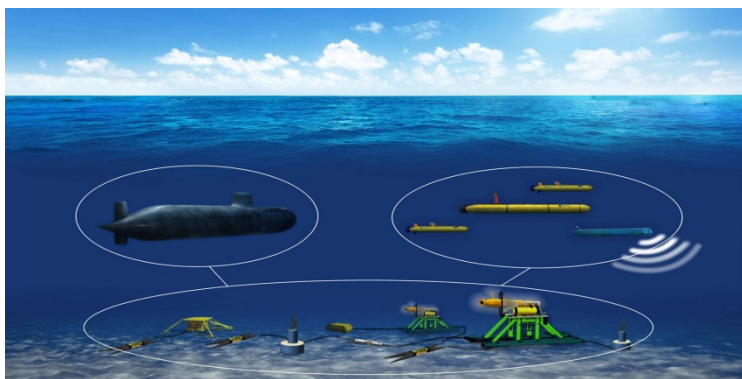


Рисунок 1. Поисковые подводные аппараты экологической разведки морского дна.

В последнее время подводная UWOC привлекает внимание исследователей благодаря своей большой пропускной способности, высоким скоростям передачи данных и отсутствию влияния электромагнитных помех. Традиционная гидроакустическая система несмотря на то, что она имеет подавляющее преимущество в области дальней подводной связи из-за узкой полосы пропускания, добиться высокоскоростной передачи данных довольно трудно. В настоящее время UWOC базируется, в первую очередь, на линии связи прямой видимости (LOS). Однако подводная среда настолько сложна, что на качество функционирования LOS в значительной степени влияет множество факторов, таких как, например, пузырьки воздуха, мутность, океаническая турбулентность и так далее.

Будучи новейшей технологией UWOC может сбалансировать передачу на большие расстояния и высокую скорость передачи данных. Для этого можно использовать участок с низким затуханием, который находится в видимом диапазоне электромагнитного спектра и имеет длину волны приблизительно 522 нм (рис. 2). С достаточно быстрым распространением технологии Интернет океан в ближайшее время будет более детально исследован человеком. Океанские буи, спутники, самолеты, суда и прочие транспортные средства способны сформировать специальную спутниково-наземную сеть, которая в ближайшем будущем покрывает северные акватории с помощью UWOC [4, 5].

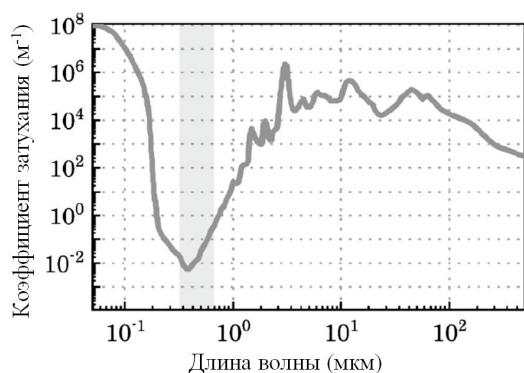


Рисунок 2. Затухание лазерного излучения под водой при различных длинах волн.

Несмотря на значительные достижения в области развития UWOC сложность подводной среды по-прежнему создает проблемы для ее использования. Такие непредвиденные факторы, как косяки рыб, камни морского дна, мутность и океаническая турбулентность значительно ухудшают производительность каналов UWOC, которые в основном используют прямую видимость LOS. Для примера, камни морского дна блокируют линию связи, вследствие чего передача UWOC прерывается (рис. 3). Чтобы сохранить связь UWOC более надежной, ученые добились определенного прогресса в области отсутствия прямой видимости (NLOS) [6].



Рисунок 3. Подводные аппараты, использующие линии связи полного отражения на границе раздела воздух-вода.

В данной статье продемонстрированы новые возможности NLOS UWOC, основанные на полном внутреннем отражении на границе раздела воздух-вода, и приведены результаты дополнительных исследований влияния на функционирование UWOC при изменении частоты и амплитуды волн. Физически процесс полного внутреннего отражения на границе раздела воздух-вода представлен на рисунке 4.

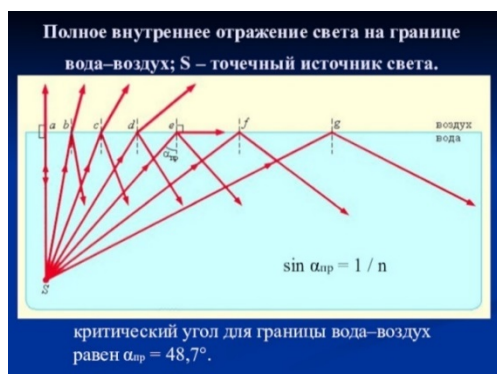


Рисунок 4. Полное внутреннее отражение на границе раздела воздух-вода.

2. Методы решения

На рисунке 5 показана система UWOC, использующая микросветодиод на основе технологии InGaN (далее InGaN-микросветодиод) и двухпозиционную манипуляцию без возврата к нулю NRZ-OOK [7]. Со стороны передатчика микросветодиод управлялся устройством тройного смещения, которое сочетает в себе постоянный ток (DC) от прецизионного параметрического анализатора KEYSIGHT B2902A с псевдослучайными двоичными последовательностями (PRBS) от анализатора Agilent J-BERT E8403A. Здесь излучаемый световой поток коллимируется плоско-вогнутой линзой, а затем передается через резервуар для воды размерами 1,8 м × 0,5 м × 0,3 м в котором используется эффект полного внутреннего отражения на границе раздела воздух-вода. На приемном конце оптический выходной сигнал фокусируется с помощью выпуклой линзы, а затем захватывается фотодетектором с полосой пропускания 100 МГц. Суммарные расстояния, состоящие из расстояний между источником света и линзой, линзой и входом в резервуар, длины резервуара, расстояний от конца резервуара до собирающей линзы и собирающей линзы до детектора составляют 1 см, 10 см, 180 см, 10 см и 4 см соответственно. Электрический выходной сигнал детектора усиливается усилителем мощности и затем тестируется анализатором Agilent E8403A для фиксации битовых ошибок с целью получения значений коэффициента битовой ошибки BER. В представленной экспериментальной установке исследования канала UWOC для

генерации волн использовался водяной насос Jebao SCP-150M мощностью 50 Вт, который способен создавать прямоугольные или синусоидальные колебания воды, при этом менять их частоту и амплитуду.

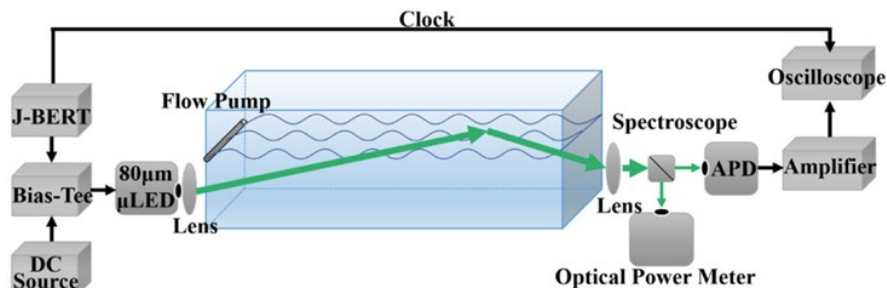


Рисунок 5. Структурная схема экспериментальной установки предлагаемой линии связи UWOC на InGaN-микросветодиоде размером 80×80 мкм.

3. Результаты и обсуждение

Результаты зависимости выходной оптической мощности и напряжения от тока при тестировании InGaN-микросветодиода показаны на рисунке 6 (а). здесь невооруженным глазом можно заметить, что пороговое напряжение микросветодиода составляет около 2,4 В, и по мере увеличения напряжения кривая зависимости оптической мощности от тока постепенно становится линейной. Когда в систему добавляется небольшой модулированный сигнал переменного тока, оптическая мощность будет меняться практически линейно, что говорит об эффективности применения способов модуляции InGaN-микросветодиодов в каналах UWOC.

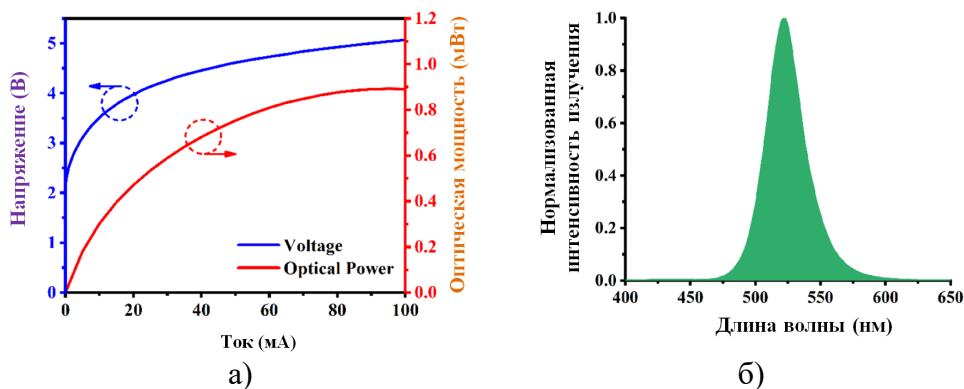


Рисунок 6. Электрические характеристики InGaN-микросветодиода (а) и его спектр электролюминесценции (б).

Спектры электролюминесценции (рис. 6 (б)) были измерены с использованием спектрометра JETI Spectral 1501. Результаты эксперимента указывают на пик интенсивности излучения InGaN-микросветодиода при длине волны около 522 нм и токе 80 мА. На рисунке 7 показано, что при увеличении тока инжекции с 10 мА до 100 мА полоса пропускания по уровню -3 дБ также увеличивается с 26,3 МГц до 98,1 МГц. Следует обратить внимание, что фотодетектор APD (рис. 5), используемый для теста частотной характеристики, имеет ограниченную полосу пропускания в 100 МГц, что ограничивает максимальную измеренную полосу модуляции -3 дБ модуля на InGaN-микросветодиоде.

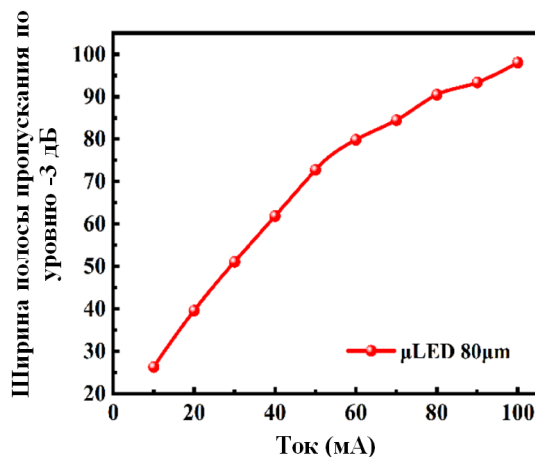


Рисунок 7. Характеристики ширины полосы пропускания по уровню -3 дБ при различных токах смещения от 10 мА до 100 мА.

Следует отметить, что при использовании в системе UWOC параллельно подключенных микросветодиодных матриц InGaN общим разрешением 5000 пикселей, изготовленных по технологии «флип-чип», с размером шага расположения микросветодиодов 15 мкм, оптической мощности 3,5 мВт и токе возбуждения 300 мА, скорость передачи данных может достигнуть 92 Мбит/с при BER $3,41 \cdot 10^{-3}$, что по оценкам экспертов равнозначно расстояниям 50 м в водопроводной воде и 10 м в морской воде. Таким образом, высокая пропускная способность и оптическая мощность излучения в каналах UWOC могут быть сбалансированы.

Чтобы выбрать подходящий угол полного отражения, был проведен тестовый эксперимент. Для достижения полного отражения светового излучения в определенном диапазоне менялся угол наклона, регулируя расстояние между передатчиком и приемником. В этом эксперименте для проверки реализации канала связи по полному

отражению был выбран диапазон углов наклона от 0° до 40° . Результаты показали, что изменение угла полного отражения в диапазоне от 0° до 40° (рис. 8 (а)) практически не влияет на результаты эксперимента. Следовательно, также не будет наблюдаться существенное влияние и на производительность канала UWOC. Для всех следующих экспериментов будет использоваться линия связи UWOC с полным углом отражения 7° .

Для исследования влияния частоты волн водной поверхности на линию связи UWOC использовались волны различной частоты, которые сопровождалось путем регулирования мощности светового потока InGaN-микросветодиода. Поскольку мощность потока регулировалась ступенчато, были определены три фиксированные частоты: 0,4 Гц, 1,0 Гц и 2,2 Гц. На рисунке 8 (б) представлена взаимосвязь между скоростями передачи данных и BER в экспериментальных условиях, когда частоты изменения оптической мощности различны. Следует обратить внимание, что в данной части эксперимента осуществлялся контроль амплитуды изменения оптической мощности, в то время, как частота была различной. Из рисунка 8 (б) ясно видно, что, хотя частота оптической мощности изменилась, соотношения между скоростью передачи данных и BER примерно одинаковы. По сравнению с рисунком 8 (а) максимальная скорость передачи данных в случае колебаний водной поверхности составляет всего около 230 Мбит/с, что заметно ниже скорости при неподвижной поверхности воды (300 Мбит/с). Таким образом, можно сделать вывод, что частотное изменение амплитуды оптической мощности излучения имеет большее влияние на производительность канала UWOC, в то время, как характеристики частоты изменения оптической мощности практически идентичны.

Поскольку различные частоты колебаний оптической мощности совсем незначительно влияют на производительность UWOC, следующий эксперимент заключался в изучении влияния изменения амплитуды оптической мощности на функционирование канала UWOC. Были выбраны три значения амплитуды изменения оптической мощности: 10 мкВт, 20 мкВт и 40 мкВт при полном угле отражения 7° . На рисунке 8 (в) показана взаимосвязь между скоростью передачи данных и коэффициентом битовой ошибки BER в экспериментальных условиях, когда частота изменения оптической мощности одна и та же (1,0 Гц), а амплитуда изменения оптической мощности излучения разная. В ходе эксперимента были получены максимальные

скорости передачи данных 280 Мбит/с, 230 Мбит/с и 200 Мбит/с при значениях оптической мощности 10 мкВт, 20 мкВт и 40 мкВт с коэффициентами BER $2,63 \cdot 10^{-3}$, $3,42 \cdot 10^{-3}$ и $2,57 \cdot 10^{-3}$ соответственно [8].

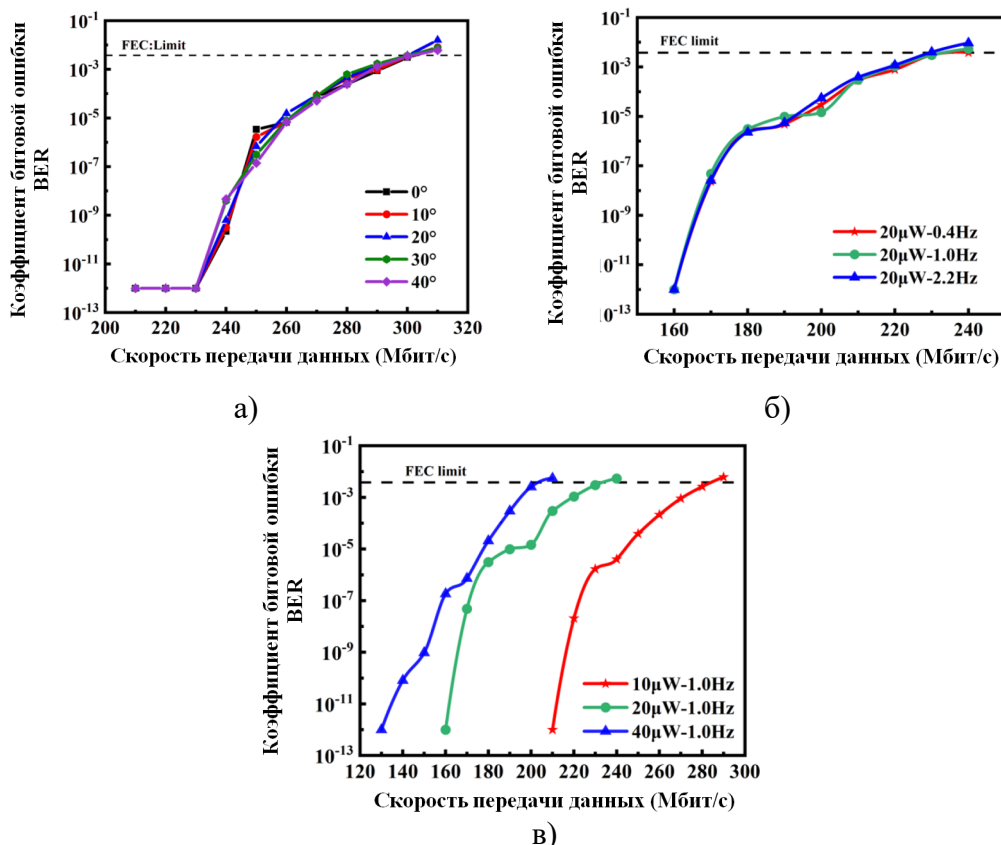


Рисунок 8. Зависимость коэффициента битовой ошибки BER от скорости передачи данных: при изменении угла наклона светового излучения в диапазоне от 0° до 40° (а), на разных частотах при фиксированной оптической мощности 20 мкВт (б), при различных уровнях оптической мощности на частоте 1,0 Гц (в).

4. Выводы

Таким образом, с использованием одного InGaN микросветодиода 80×80 мкм и длине волны излучения 522 нм была реализована линия связи UWOC на основе полного отражения на границе раздела воздух-вода. Анализ графиков полученных характеристик показывает, что когда установление надежной линии прямой видимости LOS UWOC становится невозможным, в качестве альтернативного способа передачи данных в водной среде может являться именно предложенный в статье. При наличии угла полного отражения 7° по оптическому каналу UWOC была достигнута максимальная скорость

передачи данных 300 Мбит/с при коэффициенте битовой ошибки BER $3,10 \cdot 10^{-3}$. Результаты экспериментов показали, что волнение водной поверхности может привести к ограничению скорости передачи данных до 200 Мбит/с при коэффициенте BER $2,57 \cdot 10^{-3}$. Для обеспечения желаемой высокой скорости передачи данных в условиях морской воды метод организации оптической линии NLOS достаточно сложен, и потребует в будущем более детальных исследований при использовании его с ПА в морской воде [9, 10]. Поскольку в эксперименте использовался способ модуляции NRZ-ООК, амплитуда изменения оптической мощности излучения очень сильно влияла на такие параметры каналов UWOC как соотношение сигнал/шум SNR, и, соответственно, коэффициент битовой ошибки BER. В свою очередь, для повышения производительности системы UWOC рекомендуется использовать модуляцию типа PPM, которая может сделать практически нечувствительной ее к изменению мощности сигнала. В итоге, предлагаемый эффект полного отражения от границы вода-воздух NLOS является альтернативным вариантом организации подводного оптического канала связи между поисковыми ПА, что в значительной степени повысит эффективность осуществления экологического мониторинга морского дна арктической зоны Российской Федерации, особенно в труднодоступных районах.

Список литературы

1. Ксенофонтов Ю.Г. Вопросы повышения эффективности использования информационно-телекоммуникационного ресурса подводных робототехнических комплексов / Ю.Г. Ксенофонтов, Г.В. Ильин // Развитие науки и практики в глобально меняющемся мире в условиях рисков: сборник материалов XVIII Международной научно-практической конференции, Москва, 30 апреля 2023 года. – Москва: АЛЕФ, 2023. – 244-252 с.
2. Кожемякин И.В. Перспективные платформы морской робототехнической системы и некоторые варианты их применения / И.В. Кожемякин, А.П. Блинков, К.В. Рождественский, В.Д. Мелентьев, В.Ю. Занин // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 1 (174) – С. 59-66.
3. Ксенофонтов Ю.Г. К вопросам организации и оценки эффективности беспроводной лазерной системы связи с подводными робототехническими комплексами /

- Ю.Г. Ксенофонов // Достижения науки и технологий-ДНиТ-11-2023: Сборник научных статей по материалам II Всероссийской научной конференции, Красноярск, 27–28 февраля 2023 года. Том Выпуск 7. – Красноярск: Общественное учреждение «Красноярский краевой Дом науки и техники Российского союза научных и инженерных общественных объединений», 2023. – С. 455-461.
4. Датьев И.О. Развитие инфотелекоммуникационных систем арктических территорий / И.О. Датьев // Труды Кольского научного центра РАН. – 2014. – № 5 (24). – С. 41-63.
 5. Антропов Д.А. Проблемы эксплуатации множества группировок радиоэлектронных средств различного назначения в ходе формирования современной информационно-телекоммуникационной инфраструктуры арктических регионов страны / Д.А. Антропов // Арктика: экология и экономика. – 2014. – № 2 (14). – С. 67-78.
 6. Jagadeesh V.K., Choudhary A., Bui F.M. Muthuchidambaranathan, P. Characterization of Channel Impulse Responses for NLOS Underwater Wireless Optical Communications. In Proceedings of the 2014 Fourth International Conference on Advances in Computing and Communications, Delhi, India, 24–25 May 2014. – P. 77-79.
 7. Liu Z., Lin C., Hyun B., Sher C., Lv Z., Luo B., Jiang F., Wu T., Ho C., Kuo H. et al. Micro-light-emitting diodes with quantum dots in display technology. Light-Sci. Appl. – 2020. – 9. – 83.
 8. Liu W., Zou D., Xu Z., Yu J. Non-line-of-sight scattering channel modeling for underwater optical wireless communication. In Proceedings of the IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Shenyang, China, 8–12 June 2015; pp. 1265–1268.
 9. Мирошников В.И. Составной тракт доведения информации до робототехнических комплексов в северных морях / В.И. Мирошников, П.А. Бутко, Г.А. Жуков // Техника средств связи. – 2019. – № 3 (147). – С. 2-26.
 10. Martynov V. L., Skripnik I. L., Ksenofontov Yu. G. Questions of type selection of lighting devices for underwater telecommunication television systems // IOP Conference Series, St.Petersburg, 03–06 марта 2021 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall. – Krasnoyarsk, Russian Federation: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 22094. – DOI 10.1088/1742-6596/1889/2/022094. eLIBRARY ID: 46260836.