



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра прикладной океанологии ЮНЕСКО-МОК и охраны природных вод

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(Магистерская диссертация)

«ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В ПОДВОДНОЙ СРЕДЕ»

Исполнитель: Кумпан Софья Андреевна, студент группы ПО-М17-1-8

Научный руководитель: д.г.н., профессор, Аверкиев Александр Сергеевич

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

(ученая степень, ученое звание)

(фамилия, имя, отчество)

«__» _____ 20__ г.

Санкт-Петербург

2019

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	2
1 LI-FI ТЕХНОЛОГИЯ – ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ	4
1.1 Принцип работы системы Li-Fi.....	4
1.2 Область применения	7
1.3 Преимущества применения системы в водной среде.....	13
<i>Вывод</i>	17
2 ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ LI-FI СИСТЕМЫ В ВОДНОЙ СРЕДЕ.....	20
2.1 Оптико-физические свойства воды.....	20
2.2 Анализ влияния оптико-физических свойств воды на работу системы	26
2.3 Черное море как возможный район применения	31
<i>Вывод</i>	45
3 ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ LI-FI ДЛЯ РАБОТЫ В ВОДНОЙ СРЕДЕ ...	48
3.1 Теоретическое представление системы: цели и задачи	48
3.2 Схема системы	50
3.3 Рекомендации к использованию	55
<i>Вывод</i>	57
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	59
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	65

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос качественного проведения научно-исследовательских работ в области океанологии и океанографии всегда стоит на первом месте при изучении мирового океана. Ни для кого не секрет, что на сегодняшний день степень развития технологий предоставляет невообразимую для прежних времен широту для новых исследований, каждый день создавая все новые и новые методы и решения задач, стоящих перед ученым сообществом. И как не стоит на месте развитие технологий, которые для обычных людей уже считаются базовыми нуждами, так и не должно стоять на месте и развитие тех видов систем и приборов, которыми пользуются сейчас современные океанологи.

Разнообразие методов специальных океанологических исследований на сегодняшний момент просто огромно. Большая часть из них имеет в своем составе разнообразные системы передачи данных, но не многие из них способны работать под водой. Некоторые системы, например, на основе радиоволн, не могут работать под водой так как вода гасит радиоволны, а некоторые – например кабель-трос – в определенной мере уменьшают маневренность системы. Так же существует возможность передавать информацию через подводный звуковой канал, что позволяет передать данные на сверхдальние расстояния, так как скорость звука в ПЗК намного выше чем скорость звука вне канала.

Но не смотря на то, что эти способы хорошо изучены и уже завоевали доверие в научной среде, автор предлагает рассмотреть другой способ передачи данных, имеющий большой потенциал с точки зрения применения одновременно и в водной и в воздушной среде.

Таким способом может являться передача данных по средствам системы передачи данных по световому каналу (visible light communication – VLC) – технология Light-Fidelity или Li-Fi технология.

Li-Fi – это технология беспроводной связи, которая использует инфракрасный и видимый спектр света для высокоскоростной передачи данных. Данная коммуникационная технология является двунаправленной и в отличие от радиоволн в Wi-Fi может быть использована под водой.

Актуальность. Li-Fi это технология двунаправленной беспроводной передачи данных, которая может использовать инфракрасный и видимый спектр света для передачи данных с одного аппарата на другой. Так как этот способ передачи данных в отличие от радиоволн и Wi-Fi может быть использована под водой, определение потенциала использования подобного способа передачи данных является очень актуальной задачей на сегодняшний день.

Цель работы. Определение направлений использования Li-Fi систем для аппаратно-комплексных систем для океанологических исследований.

Задачи.

- Рассмотреть принцип работы системы Li-Fi и области ее применения;
- Выявить особенности работы системы Li-Fi под водой;
- Провести анализ влияния оптических свойств воды на работу системы;
- Определить эффективность работы системы;
- Разработать схему системы;
- Анализ полученных результатов.

Объектом исследования являются морская среда (Черное море) как среда для передачи светового излучения.

Предметом исследования является технология двунаправленной беспроводной связи Li-Fi.

1 LI-FI ТЕХНОЛОГИЯ – ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ.

Li-Fi (Light Fidelity) – это технология беспроводной передачи данных, основанная на использовании инфракрасного и видимого спектра света в качестве канала связи для высокоскоростной передачи данных. Данная технология является двунаправленной и в отличие от радиоволн может быть использована под водой. Li-Fi относится к коммуникациям через видимый свет (VLC - Visible Light Communication). Технология, впервые представленная профессором Хаасом в [1] открывающая возможность использования полностью беспроводной сетевой связью, как в мобильных, так и в стационарных устройствах. Также допускает многопользовательский доступ к сети [2].

1.1 Принцип работы системы Li-Fi

В основе принципа работы системы лежит передача данных через световой канал – будь это видимый спектр света, или инфракрасное излучение. В общем случае канал связи организовывается между передатчиком (источником света или излучения) и фотодетектором. Скорость передачи данных будет полностью зависеть от используемой технологии освещения и цифровой модуляции сигнала. В качестве технологий освещения в первую очередь представляют светодиоды (LED лампы), RGB лазеры, и диоды инфракрасного излучения (RGB диоды) (рисунок 1).



Рисунок 1 – Типы световых элементов.

В качестве основных LED ламп применяются голубые диоды с фосфорным напылением, галлия-нитридные микросветодиоды, RGB цветные LED лампы. Под цветными лазерами подразумеваются лазерные излучатели, оптоэлектронные компоненты, включающие в себя полупроводниковые лазерные диоды и лазерные модули со встроенными схемами управления.

Что же касается инфракрасного излучения, то принцип работы не сильно меняется. Мы все еще имеем передатчик и приемник, а также систему кодирования информации. Классическим методом передачи информации считается передача данных через инфракрасный порт – группу стандартов, описывающую протоколы физического и логического уровня передачи данных с использованием инфракрасного излучения (IrDA). Однако это далеко не единственный способ. Всем известное управление телевизором через пульт управления так же происходит через инфракрасное излучение. Такой способ передачи данных удобен при удаленном управлении устройством в пространстве, если речь идет об управлении НПА. Однако такой способ не будет являться эффективным при работе на дальних расстояниях из-за физических и оптических свойств воды и самого инфракрасного излучения.

Голубые LED лампы состоят из синего светодиода высокой яркости с фосфористым покрытием, которое преобразует синий свет в желтый. Когда синий свет и желтый свет объединяются, свечение диода становится белым. На сегодняшний день это самый экономичный способ получения белого света, но материал для преобразования цвета люминофора замедляет частотный отклик, то есть более высокие частоты сильно ослабляются. Следовательно, полоса пропускания этого типа светодиодов находится только в области 2 МГц. Однако, применение даже такого способа фильтрации света помогает достичь скорости передачи данных до 1 Гбит в секунду. Более продвинутое освещение (цветные светодиоды) обеспечивают скорость передачи данных до 5 Гбит / с, поскольку

в них белый свет получается путем смешивания базовых цветов вместо использования химического преобразования цвета. Были продемонстрированы скорости передачи данных с одним микросветодиодом 8 Гбит / с [3], и было показано, что достижение 100 Гбит / с возможно с лазерным освещением [4].

В виду специфики данной технологии существует много заблуждений относительно Li-Fi систем. Во-первых, у большинства возникает вопрос о работоспособности данной технологии в условиях солнечного освещения.

Солнечный свет представляет собой постоянный мешающий сигнал за пределами полосы пропускания, используемой для модуляции данных. Li-Fi работает на частотах, обычно превышающих 1 МГц. Поэтому постоянный солнечный свет может быть удален с помощью электрических фильтров. Дополнительным эффектом солнечного света является повышенный световой шум, который не может быть легко устранен с помощью оптических фильтров. В исследовании [5] влияние дробового шума было исследовано качественно и было обнаружено, что скорость передачи данных снижается на 1,5% и 4,5% при условии, что детекторы имеют размеры 0,19 мм² и 2 мм² соответственно. Насыщенность можно избежать, используя алгоритмы автоматического управления усилением в сочетании с оптическими фильтрами. На самом деле солнечный свет чрезвычайно полезен, поскольку он позволяет работать приемникам Li-Fi на солнечных батареях, где солнечный элемент действует как устройство приема данных, и в то же время убирает солнечный свет в качестве энергии [6].

Во-вторых, опасения вызывает то, что световой сигнал якобы может быть затемнен. Однако это тоже не так. Световые сигналы не могут быть затемнены: существуют усовершенствованные методы модуляции, такие как eU-OFDM [7], которые позволяют работать Li-Fi близко к включенному напряжению (ToV) светодиода, что означает, что огни могут работать при

очень низком световом выходе при сохранении высоких скоростей передачи данных.

В-третьих, существуют опасения о снижении эффективности при мерцании светового потока. Однако самая низкая частота, с которой модулируются световые сигналы, находится в области 1 МГц. Частота обновления экрана компьютера составляет около 100 Гц. Это означает, что скорость мерцания лампочки Li-Fi на 10 000 выше, чем у экрана компьютера. Таким образом мерцание не влияет на работу сигнала.

В-четвертых, опасение, связанное с предположением о том, что канал связи может быть только мононаправлен, соответственно в один момент времени работа осуществляется только для входного или выходного сигнала, но это не так, так как два одновременных световых потока не будут пересекаться и направление потока данных, соответственно, тоже меняться не будет. Более того, возможно использование комбинированной системы, когда в нисходящем канале используется светодиодное освещение, а в восходящем инфракрасное излучение.

Данный способ связи существенно расширяет границы возможностей передачи данных. На сегодняшний день активно проходят исследования касающиеся применения Li-Fi технологий в подводной сфере деятельности человека. К сожалению, по большей части все эксперименты являются закрытыми и доступа к их результатам практически нет. Опираясь на информацию в открытых источниках, был сделан вывод, что данная технология наилучшим образом могла бы быть применена в океанологии при создании систем автономного использования, таких как автономные подводные аппараты для проведения океанологических и океанографических исследований.

1.2 Область применения

Li-Fi технология которая в большинстве случаев способна заменить Wi-Fi и другие радиочастотные способы передачи связи. Для некоторых ситуаций

использование Li-Fi будет являться более безопасной альтернативой, в иных случаях Li-Fi будет являться единственным высокоскоростным методом связи. Таким образом Li-Fi можно применять в следующих ситуациях и окружении [8]:

- В больнице:

Так как Li-Fi не мешает приборами, работающим на радиочастотах, Li-Fi можно безопасно использовать в больницах. Например, в коридорах, залах ожидания, палатах для пациентов и операционных, технология Li-Fi позволит создать сеть связи, которая устранит проблемы электромагнитных помех от смартфонов при использовании Wi-Fi в больницах. Li-Fi можно также использовать для контроля в реальном времени передвижений пациентов и жизненно важных показателей без потребности в проводах.

- В аэропортах:

Применение системы в аэропортах является так же очень удачным. По той же причине, что и в больницах – система не мешает работать приборам на радиочастотах, а значит не будет мешать работать основным системам связи с самолетами и метеорологическими станциями, позволяя функционировать аэропорту без сбоев.

- В самолетах:

Wi-Fi в самолетах применяется крайне редко, по многим причинам из-за того, что электромагнитные радиоволны роутеров мешают работе приборов и связи с диспетчерами. Применение Li-Fi в данном случае будет максимально эффективным.

- В офисах и школах:

Система Li-Fi предоставляет самое защищенное подключение с точки зрения информационной безопасности в сравнении со всеми другими, доступными на сегодняшний день. Помимо освещения, система может давать доступ к сети

интернет не проходящем через стены способом, а значит и подключение к локальной сети так же становится максимально безопасным.

- В научно-исследовательских проектах:

Использование телеуправляемых аппаратов для получения данных в режиме реального времени на сегодняшний момент является самым часто используемым методом. Однако системы с таким типом связи не мобильны и не могут быть использованы в труднодоступных местах. Альтернативой им являются автономные аппараты, работающие по заданной заранее программе. Но такие аппараты в большинстве случаев не используются как мобильные устройства – их основная работа выполняется в стационарном комплексе и связь с исследователем они получают через искусственные спутники земли. Такой метод специальных океанологических исследований широко применяется по всему Мировому Океану, а основным представителем являются буи «АРГО» - сеть дрейфующих – ныряющих буюв для проведения океанографических измерений в верхнем слое океана в реальном масштабе времени. Система работает вместе со спутниковыми наблюдениями создает оперативную океанологическую систему, аналогичную глобальной системе наблюдений за атмосферой. Буй "АРГО", выпущенный на поверхность, опускается до глубины 2000 метров и дрейфует с течением на этой глубине в течение 10 дней, затем поднимается на поверхность, измеряя распределение температуры и солености по глубине. На поверхности буй передает по радио данные измерений и свое положение на орбитальный спутник и затем вновь опускается на глубину для продолжения цикла измерений. Буи разработаны для осуществления 150 таких циклов. Продолжительность работы буюв оценивается от 4 до 5 лет. В случае потери буюв исследователи не терпят больших финансовых потерь – система относительно дешева в производстве.

Основной целью при разработке такого аппарата должна служить необходимость избавления или уменьшение частоты использования телеуправляемых систем, а также решение задачи по получению данных с

аппаратов, утеря которых принесет большие потери со стороны исследований, а не только с финансовой стороны. Подобный метод сбора данных с аппаратов поможет в ситуациях, при которых другие способы передачи информации не доступны по тем или иным причинам. Использование технологий, описанных далее, может значительно повысить качественные показатели проводимых исследований повысив уровень технических характеристик самих автономных управляемых подводных аппаратов. Если брать во внимание возможность исключения из конструкции аппаратного комплекса кабеля для передачи данных и управления прибором, то применение такого метода значительно повысит маневренность аппарата, что в свою очередь сделает его более мобильным.

Как было сказано ранее, основной областью использования рассматривается океанологические и океанографические исследовательские комплексы, включающие в себя автономные обитаемые подводные аппараты применения, которых связано с изучением труднодоступных областей, таких как подледные исследования, или изучение районов с разнообразным рельефом, где применение телеуправляемых аппаратов было бы затруднительным.

Преимуществами такой системы можно будет назвать уже упомянутое повышение мобильности автономных аппаратов. Также к числу преимуществ следует добавить возможность получать данные не поднимая аппарат на поверхность, что дает возможность в случае необходимости получить данные с аппарата доступ напрямую к которому не возможен по ряду причин, например, потому что его движительная система повреждена или он попал в зону, откуда достать его без помощи водолазов не представляется возможным.

Австралийская компания nextLiFi разрабатывает собственную систему подводной связи [9], которая будет использоваться в целях связи между аквалангистами (рисунок 2).

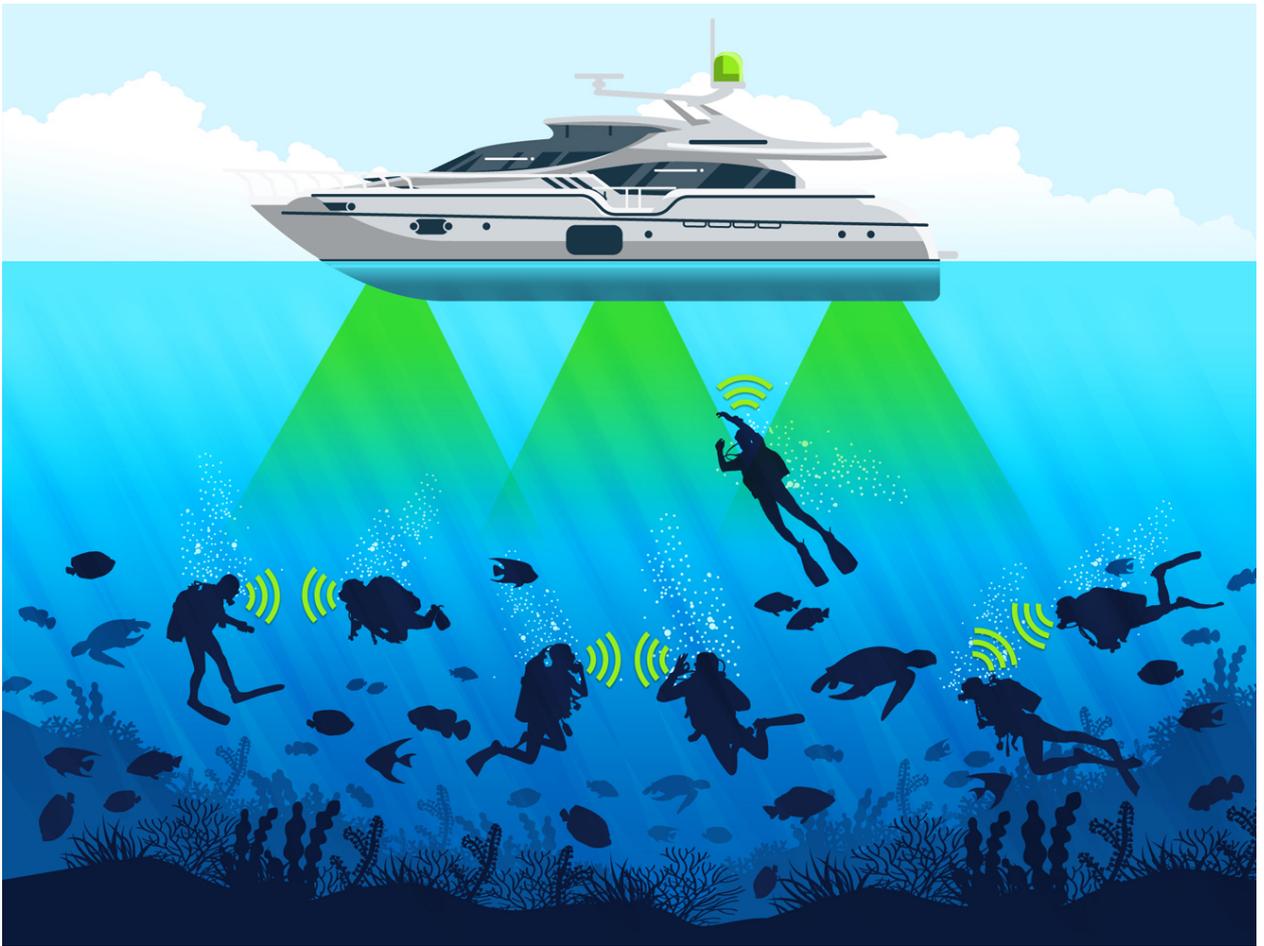


Рисунок 2 – визуализация проекта nextLiFi.

Таким же образом подобная система связи через световой канал может быть использована:

- На подводных лодках – данные могут передаваться между двумя подводными лодками и препятствие в пути можно обнаружить;
- Для безопасности частных и коммерческих рыболовных судов в дополнение к радио связи – в случае если такое судно обнаруживает какую-то проблему в море и свой корабль, то он может отправить сообщение другому кораблю или центральному органу;
- Спасательные операции в море – если спасательная операция происходит в море, то информация может передаваться с одного корабля на другой;

- Во время патрулирования – если неизвестный корабль находится в море, то патрульный корабль также отправляет информацию в центральный орган [10];
- Для дистанционного беспроводного управления подводными аппаратами;
- Как метод связи между подводными аппаратами и байковыми станциями.

В статье компании RDL Technologies Pvt Ltd [11] описывается система, работающая совместно с радиоволнами, дополняя и расширяя возможности друг друга. Система, которую они предлагают базируется на идее того, что акустические системы связи несовершенны, хотя и являются одним из основных способов подводной связи. Акустические системы способны к дальней связи, но имеют ограничения в скорости передачи данных и значительную задержку (из-за скорости звука в воде). Они создают систему оптической связи которая дополняет существующие акустические системы, и позволяет расширить применение автономных подводных аппаратов – лишить их необходимости подключения по кабелю для передачи информации. Такая система поможет упростить операции с подводными дронами и потенциально сократит расходы за счет использования легких и менее оборудованных надводных судов. Более того, будет усилено оперативное реагирование на события, а ремонт и техническое обслуживание формирующейся инфраструктуры океанских обсерваторий станут более эффективными с точки зрения затрат. Такая связь также позволит обмениваться большими файлами данных с фиксированных датчиков с использованием АНПА в качестве метода сбора информации, передавать видео в реальном времени с отвлеченных транспортных средств для осмотра, идентификации и других связанных с этим операций. Так же возможна установка сети подводных датчиков (на доступной для работы системы глубине) заменяющих подводные кабели. Беспилотный аппарат на любых доступных батареях, по мнению компании, привязанный к подобному подводному узлу, можно будет эксплуатировать через связь

сочетающую акустический и оптический канал, будет важным активом как для научного исследования, так и для коммерческих применений.

Таким же образом можно построить систему буйковых станций, между которыми будут курсировать автономные или управляемые беспилотные аппараты – принцип такого комплекса будет заключаться в том, что АНПА, курсируя по запрограммированной траектории или управляемый дистанционно будет проводить замеры и передавать их через Li-Fi на буйковые станции, которые в свою очередь будут передавать данные по спутниковой или радио связи. При переходе с литий-ионных батарей на графеновые [12] можно исключить из подобной системы буи – подводный аппарат будет способен сохранять большее количество энергии и самостоятельно передавать данные. Графен – современный материал, необычные электронные свойства которого, а также возможность его химической модификации делают его многообещающим материалом для целого ряда областей микроэлектроники – например в качестве аккумуляторных батарей. Удельная ёмкость данных аккумуляторов в 5 раз превышает данный показатель у литий ионных батарей. Также следует отметить что графен-полимерные батареи безопасней и не склонны к возгоранию и взрывом в отличие от литий-ионных. Также следует отметить что графен-полимерные аккумуляторы могут увеличивать время работы аппарата как минимум в 3 раза.

1.3 Преимущества применения системы в водной среде

Для начала рассмотрим преимущества перед другими известным способами беспроводной передачи данных – Wi-Fi. Очевидным преимуществом является то, что в отличие от систем на радио частотах вода не поглотит сигнал полностью – поглощена будет только часть сигнала, а остаток будет передан с минимальным количеством ошибок. Скорость работы системы и количество данных для передачи существенно больше, чем через подводный звуковой канал. Область работы системы так же намного шире чем

подводный звуковой канал – широта применения не ограничивается узкой областью ПЗК, ограничениями для использования будет являться только высокая вымученность воды или термоклин. Таким образом основными преимуществами перед другими способами передачи данных под водой будут являться:

- Отсутствие радикального поглощения сигнала водой
- Высокая скорость передачи данных
- Большее количество данных, которые система может передать
- Область применения шире чем у ПЗК

Кроме очевидных преимуществ над радиочастотными методами передачи данных, ключевыми преимуществами беспроводной сети Li-Fi являются:

- Увеличение плотности передачи данных в три раза [10];
- Уникальные свойства, повышающие уровень физической безопасности сети [11];
- Использование в искробезопасных средах, таких как нефтехимические заводы и нефтяные платформы;
- С появлением Power-over-ethernet (PoE - технология, позволяющая передавать удалённому устройству электрическую энергию вместе с данными через стандартную витую пару в сети Ethernet) и его использования в освещении существует возможность обратной связи с существующими инфраструктурами сети передачи данных для необходимых транзитных соединений между источниками света с его встроенным Li-Fi модемом и Интернетом.

Li-Fi работает как дополнение к радиочастотным сетям. С этой целью были проведены исследования гибридных сетей Li-Fi /радиочастотные сети, и сделаны три основных вывода:

- Сети Li-Fi значительно улучшат качество услуг для мобильных пользователей;
- Доставка услуг может быть бесперебойной;
- Wi-Fi сети значительно улучшают свою эффективность в совместной работе с сетью Li-Fi.

В отличие от Wi-Fi, которая использует электромагнитные волны, Li-Fi использует световой канал, который можно использовать в воде. Для лучшего понимания рассмотрим таблицу 1, где для сравнения представлены возможности обеих систем.

Таблица 1. Сравнение технологий Li-Fi и Wi-Fi.

Особенность	Li-Fi	Wi-Fi
Тип связи	световой	беспроводной
Функционирование	Li-Fi передает данные используя свет с помощью LED.	Wi-Fi передает данные с помощью радиоволн с помощью WiFi маршрутизатора.
Препятствия	Не конфликтует с другими точками доступа, как другие методы работающие на радиочастотах.	Будут проблемы с помехами от близлежащих точек доступа (маршрутизаторов).
Технические средства	В настоящий момент представлены как совместимые устройства работающими на Инфракрасном излучении.	Беспроводная локальная сеть стандарта 802.11a/b/g/n/ac/ad.
Применение	Используется в авиакомпаниях, подводных исследованиях, в операционных в больницах, офисных и домашних помещениях для передачи данных и работы в интернете.	Используется для работы в интернете с помощью WiFi точек доступа.
Достоинства (преимущества)	Появление шума маловероятно, может проходить через соленую морскую воду.	Большая вероятность появления шумов, не может пройти через морскую воду.
Конфиденциальность	В Li-Fi, свет блокируется стенами и, следовательно, обеспечит более безопасную передачу данных.	В Wi-Fi радиочастотный сигнал не может быть заблокирован стенами и, следовательно, необходимо использовать методы для обеспечения безопасной передачи данных.

Скорость передачи данных	Около 1 Гбит/с.	Беспроводная локальная сеть - 150 Мбит/с, около 1 - 2 Гбит/с может быть достигнут с помощью WiGig/Giga-IR.
Частота работы	в 10 тысяч раз больше, чем радио спектр	2,4 ГГц, 4,9 ГГц и 5 ГГц
Плотность записи	Высокая плотность записи.	Плотность записи относительно низкая из-за проблем с помехами.
Расстояние покрытия	Около 10 метров.	Около 32 метров (WLAN 802.11 b / 11g), варьируются в зависимости от мощности передачи и типа антенны.
Системные компоненты	Модулятор, LED (лампа) и фотодетектор представляют собой полную систему Li-Fi.	Требуется установить маршрутизаторы, абонентские устройства (Ноутбуки, КПК, настольные компьютеры) которые в последствии называются станциями.

Таким образом, можно сделать вывод, что в сравнении с Wi-Fi Li-Fi имеет больше преимуществ, нежели недостатков. К основным преимуществам следует отнести высокий уровень конфиденциальности сети, возможность использования ее под водой, и, что немало важно, в морской воде, а также высокую плотность записи и отсутствие сильных потерь.

К недостаткам же можно отнести возможность полного перекрытия потока данных при возведении преграды, полностью заслоняющей осветительный прибор. Также следует отметить рабочее расстояние – оно в три раза меньше, чем у Wi-Fi, а с учетом применения технологии под водой, расстояние также будет уменьшаться.

В целом, Li-Fi, как и любая другая система, имеет как достоинства, так и недостатки.

Вывод

Li-Fi (Light Fidelity) – это технология беспроводной передачи данных, основанная на использовании инфракрасного и видимого спектра света в качестве канала связи для высокоскоростной передачи данных. Данная технология является двунаправленной и в отличие от радиоволн может быть использована под водой. Li-Fi относится к коммуникациям через видимый свет (VLC - Visible Light Communication).

В качестве основных LED ламп применяются голубые диоды с фосфорным напылением, галлия-нитридные микросветодиоды, RGB цветные LED лампы. Под цветными лазерами подразумеваются лазерные излучатели, оптоэлектронные компоненты, включающие в себя полупроводниковые лазерные диоды и лазерные модули со встроенными схемами управления.

Li-Fi технология которая в большинстве случаев способна заменить Wi-Fi и другие радиочастотные способы передачи связи. Для некоторых ситуаций использование Li-Fi будет являться более безопасной альтернативой, в иных случаях Li-Fi будет являться единственным высокоскоростным методом связи. Таким образом Li-Fi можно применять в следующих ситуациях и окружении:

- В больнице:
- В аэропортах:
- В самолетах:
- В офисах и школах:
- В научно-исследовательских проектах:

Для использования в научно-исследовательских целях задача системы будет в первую очередь связана с работой в водной среде. . Подобный метод сбора данных с аппаратов поможет в ситуациях, при которых другие способы передачи информации не доступны по тем или иным причинам. Основной областью использования рассматривается океанологические и

океанографические исследовательские комплексы, включающие в себя автономные необитаемые подводные аппараты применения, которых связано с изучением труднодоступных областей.

Таким же образом подобная система связи через световой канал может быть использована:

- На подводных лодках – данные могут передаваться между двумя подводными лодками и препятствие в пути можно обнаружить;
- Для безопасности частных и коммерческих рыболовных судов в дополнение к радио связи – в случае если такое судно обнаруживает какую-то проблему в море и свой корабль, то он может отправить сообщение другому кораблю или центральному органу;
- Спасательные операции в море – если спасательная операция происходит в море, то информация может передаваться с одного корабля на другой;
- Во время патрулирования – если неизвестный корабль находится в море, то патрульный корабль также отправляет информацию в центральный орган [10];
- Для дистанционного беспроводного управления подводными аппаратами;
- Как метод связи между подводными аппаратами и байковыми станциями.

Преимущества системы перед другими способами передачи данных:

- Отсутствие радикального поглощения сигнала водой
- Высокая скорость передачи данных
- Большое количество данных, которые система может передать
- Область применения шире чем у ПЗК
- Уникальные свойства, повышающие уровень физической безопасности сети

- Использование в искробезопасных средах, таких как нефтехимические заводы и нефтяные платформы;

Таким образом, можно сделать вывод, что в сравнении с Wi-Fi Li-Fi имеет больше преимуществ, нежели недостатков. К основным преимуществам следует отнести высокий уровень конфиденциальности сети, возможность использования ее под водой, и, что немало важно, в морской воде, а также высокую плотность записи и отсутствие сильных потерь.

К недостаткам же можно отнести возможность полного перекрытия потока данных при возведении преграды, полностью заслоняющей осветительный прибор. Также следует отметить рабочее расстояние – оно в три раза меньше, чем у Wi-Fi, а с учетом применения технологии под водой, расстояние также будет уменьшаться.

2 ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ LI-FI СИСТЕМЫ В ВОДНОЙ СРЕДЕ

Использование Li-Fi под водой связано с некоторыми особенностями среды. Для лучшего понимания всех тонкостей работы системы в водной среде, необходимо учесть все факторы, отличающие воздушную среду от водной. Во-первых, вода отличается от воздушного пространства рассеивающими свойствами. Во-вторых, вода поглощает больше света, чем воздух. Разная плотность веществ и разный химический состав так же может стать причиной разного функционирования системы для воздушной и водной среды. Скорость света так же должна быть учтена при работе системы, так как именно она может влиять на скорость передачи данных. Во всех случаях систему необходимо строить с учетом особенностей среды, в которой система будет работать.

2.1 Оптико-физические свойства воды

Особенности работы системы в водной среде обуславливаются наличием определенных оптико-физических свойств воды. Оптические свойства воды, описанные в [15] оказывают значительное влияние на работу осветительных приборов, используемых в качестве аппаратов по передаче данных. Для корректной работы необходимо учитывать показатели ослабления, поглощения, рассеяния и состав водной среды (неорганические соли, растворенные органические соединения, планктон, бактерии, детрит, минеральные частицы). Необходимо понимать, что полный теоретический анализ оптических свойств морской воды, в настоящее время невозможен. Схематизация состоит в последовательном рассмотрении ряда теоретических моделей: чистая вода, чистая морская вода, растворенное органическое вещество и взвесь. Однако опираясь на уже известные данные можно провести анализ и определить, какое строение системы Li-Fi будет наиболее эффективно для передачи данных в воде.

В качестве основных особенностей и возможных препятствий на пути использования Li-Fi систем выделяются показатели ослабления, поглощения,

рассеяния и состав водной среды (неорганические соли, растворенные органические соединения, планктон, бактерии, неживая органическая взвесь – детрит, минеральные частицы). Однако, среди всех показателей следует выделить основной. Такой характеристикой может являться показатель ослабления, так как показатели поглощения и рассеяния можно рассчитать математически, основываясь на показателе ослабления. Также стоит отметить, что существует прямая связь между спектральным ходом показателя ослабления света с концентрации хлорофилла в Черном море, что дает возможность прогнозировать некоторые биологические параметры состава воды.

В качестве показателей эффективности нужно в первую очередь рассматривать расстояние, при котором потери в передаче данных будут минимальны. Также следует учитывать, какой спектр будет использован для передачи данных. Оба этих фактора целиком и полностью зависят от оптических свойств воды.

Коэффициент поглощения - безразмерная физическая величина, характеризующая способность тела поглощать падающее на него излучение.

$$k = \frac{1}{l} \ln \frac{F_0}{F(l)}$$

Для примера рассмотрим коэффициенты поглощения в чистой воде для видимого спектра электромагнитного излучения, представленного в таблице 2.

Табл. 2 Значения коэффициента поглощения, полученные для совершенно чистой, дистиллированной воды

Длина волны, мкм	Коэффициент поглощения	Длина волны, мкм	Коэффициент поглощения
0,658	0,320	0,602	0,173
0,643	0,291	0,590	0,089
0,622	0,239	0,579	0,049
0,617	0,244	0,558	0,038
0,612	0,233	0,522	0,002
0,607	0,200	0,494	0,002

Самый высокий коэффициент поглощения (0,320) принадлежит красной части спектра электромагнитного излучения (рис.3), а самый низкий коэффициент (0,002) принадлежит синей части спектра. Таким образом, можно сделать вывод, что, используя свет излучения синего спектра, мы получим минимальные потери в оптических свойствах поглощения света водой. Для такого света может быть использована LED лампа с фосфорным покрытием, потому что она излучает синий свет. Очевидно, что использование красного светового спектра не является эффективным, так как при его использовании водой будет поглощено значительное количество света.



Рисунок 3 – Видимый спектр электромагнитного излучения

Так как светодиоды передают информацию через кодирование по средствам изменения частоты работы (мигания), это необходимо учитывать при рассмотрении оптических свойств воды. Возникает вопрос – не может ли взвесь стать причиной отказа работы системы? Однако такого не произойдет, в соответствии с описанными ранее принципами работы, так как информация передается по всей площади освещения. Таким образом, даже если часть светового потока будет затемнена или отражена, конечный получатель (фотодетектор) получит полный объем данных. Используя такой принцип мелкие примеси и загрязнения не помешают работе системы Li-Fi.

Существует ещё один фактор, влияющий на работу Li-Fi систем - скорость света в водной среде. Как известно, скорость света в вакууме равна 299 792 458 м/сек, а в воде она уменьшается в $4/3$ раз, таким образом, аналогично этому, скорость передачи данных тоже уменьшается в $4/3$ раз, то

есть в 1,33. Очевидно, что если скорость передачи данных на поверхности была (где? на поверхности?) 10 Мбит/сек, то после погружения в водную среду скорость будет равна, примерно, 7,51 Мбит/сек.

Показатель ослабления – величина, обратная расстоянию L , на котором поток монохроматического излучения F , распространяющегося в воде в виде параллельного пучка, ослабляется в результате суммарного действия поглощения и рассеяния в десять раз при десятичном основании или в e раз при натуральном основании. Показатель ослабления рассчитывается математически по формуле:

$$\varepsilon = -\frac{1}{L} \ln \frac{F_0}{F_L(\varepsilon)}$$

Показатель ослабления можно представить, как

$$\varepsilon = \kappa + \sigma,$$

где κ – показатель поглощения, а σ – показатель рассеяния излучения.

На сегодняшний день Морском Гидрофизическом Институте располагает обширным количеством данных показателя ослабления по Черному морю. Все современные наборы данных были получены при помощи спектрального измерителя коэффициента ослабления света. Этот контактный метод измерений используется ФБГУ МГИ РАН, как основной способ замера показателя ослабления света.

Таблица 3. Характерные величины показателя ослабления в глубоководных районах на длине волны 460 нм.

Период	Минимум (1/м)	Максимум (1/м)	Среднее (1/м)
Июль 2016 г.	0,363	1,023	0,547
Октябрь 2016 г.	0,324	2,013	0,424
Апрель-Май 2017 г.	0,314	1,089	0,381
Июнь 2017 г.	0,303	0,964	0,608

Таблица 4. Характерные величины показателя ослабления в прибрежных зонах на длине волны 370 нм.

Период	Минимум (1/м)	Максимум (1/м)	Среднее (1/м)
Июль 2015 г.	0,793	1,283	0,983
Сентябрь 2015 г.	0,418	1,514	1,080
Сентябрь 2016 г.	0,325	1,011	0,397

По результатам исследований 2015 – 2017 года наблюдаются следующие характерные значения показателя ослабления в Черном море: данные для глубоководных участков северо-восточной части Черного моря (НИС «Профессор Водяницкий»), представлены в таблице 3, для прибрежных районов у побережья Крыма (НИС «Бирюза») – в таблице 4.

Показатель ослабления проще всего измерить, вследствие чего данных о нем намного больше, чем для показателей рассеяния и поглощения, измерение которых требует более сложной аппаратуры. В то же время исследования показывают, что показатели рассеяния и поглощения в водоемах тесно коррелируют с показателем ослабления, и, таким образом, по величине ε можно оценивать величины σ и κ . Параметры связи в каждом водоеме отличаются, что обусловлено разным составом взвешенных и растворенных веществ.

Для поверхностных вод Черного моря в [16] установлена связь (коэффициент корреляции $r = 0,998$) между показателями ослабления ε и рассеяния σ направленного света на длине волны $\lambda = 525$ нм.

$$\sigma, \text{ м}^{-1} = 0,98\varepsilon - 0,0315$$

Так как $\sigma = \varepsilon - \kappa$, то из данной формулы следует связь между показателями поглощения и ослабления

$$\kappa, \text{ м}^{-1} = 0,02\varepsilon + 0,0315$$

Как было отмечено ранее, на показатель ослабления оказывают влияние биологические параметры морской воды (растворенное органическое вещество и взвесь). В результате распада органических веществ образуются гуминовые соединения, имеющие желтый цвет. Такое явление увеличивает поглощение света, что приводит к тому, что показатель ослабления направленного света увеличивается. Растворенную органику могут производить планктон, рыбы и другие подводные организмы. Так же органику может приносить в море через стоки рек и канализационные сооружения.

Также одним из распространённых факторов, способных повлиять на работу системы, можно назвать биолюминесценцию. Биолюминисцентный свет является производной химической реакции внутри живых организмов. Биолюминесценция – тип хемилюминесценции, которая является просто термином для химической реакции, относительно того, где свет был произведен. Биолюминесценция представляет собой "холодный свет", что означает, что менее 20% света генерирует тепловое излучение или тепло. Большинство биолюминисцентных организмов находятся в океане, они включают в себя рыбу, бактерии и медуз. Некоторые биолюминисцентные организмы, в том числе светлячки и грибы, встречаются и на суше. В пресной воде биолюминисцентные организмы не встречаются.

Появление биолюминисцентного света сильно варьируется в зависимости от среды обитания и организма, в котором он находится.

Большая часть морской биолюминесценции, например, выражена в сине-зеленой части спектра видимого света. Эти цвета легче увидеть на больших глубинах в океане. Соответственно, могут возникнуть опасения, что этот свет может стать помехой при работе с Li-Fi системами, однако эти опасения беспочвенны. Как и при работе под солнечным светом, декодирование сигнала происходит таким образом, что шум, создаваемый другими источниками света, фиксируется и устраняется.

В случае с инфракрасным излучением следует учитывать несколько других факторов. Оптические свойства веществ (прозрачность, коэффициент отражения, коэффициент преломления) в инфракрасной области спектра, как правило, значительно отличаются от оптических свойств в видимой и ультрафиолетовой областях. Многие вещества, прозрачные в видимой области, оказываются непрозрачными в некоторых областях инфракрасного излучения и наоборот. Во-первых, слой воды толщиной в несколько сантиметров непрозрачен для инфракрасного излучения с длиной волны более 1 мкм, в связи с чем необходимо использовать передатчики и приемники, работающие с меньшей длиной волны. Непрозрачной вода для ИК излучения становится из-за высокой степени поглощения света водой. Во-вторых, система на инфракрасном излучении может перестать работать при помещении самого инфракрасного диода в корпус из недостаточно прозрачного для излучения материала – не все виды оргстекла могут стать удачным решением для корпуса системы.

2.2 Анализ влияния оптико-физических свойств воды на работу системы

Рабочим расстоянием принято считать расстояние, пройденное лучом света через толщу воды при котором интенсивность выходного светового потока будет больше или равна половине интенсивности входного потока. Причина считать такое расстояние рабочим, заключается в том, что при интенсивности выходного потока равной меньше чем половине входного потока будет критическим для обработки ошибок.

Интенсивность светового потока современных осветительных систем, принятых за рабочие для Li-Fi технологии измерить невозможно по причине того, что поле изменяется с высокой частотой, соответственно очень малым периодом колебаний, которые современные приемники колебаний обрабатывать не могут. Поэтому в качестве интенсивности светового потока на данный момент принято считать световую отдачу.

Световая отдача (η)– это отношение излучаемого источником светового потока к потребляемой им мощности измеряется в люменах на ватт (лм/Вт) коротая рассчитывается по формуле[17]:

$$\eta = \Phi_v/P$$

Где Φ_v – световой поток, излучаемый осветительным прибором, а P – потребляемая им мощность.

Таким образом, стандартные LED с разными световыми потоками и разной мощностью будут давать разные световые отдачи. В таблице 5 представлены показатели светоотдачи на для разных диодов с разной потребляемой мощностью и разным световым потоком. Проанализировав таблицу автор приходит к выводу, что самыми эффективными осветительными приборами будут являться LED со световым потоком в 2000 люменов, в 10000 люменов и в 100000 люменов, так как потребляемая ими мощность достаточно мала что бы получить большой показатель световой отдачи.

Таблица 5 - таблица расчета световой отдачи для разных ОП.

Люмены	Минимальная мощность (Вт)	Максимальная мощность (Вт)	Максимальная световая отдача	Минимальная световая отдача
1000	8	20	125,00	50,00
2000	10	27	200,00	74,07
3000	20	35	150,00	85,71
4000	25	50	160,00	80,00
5000	30	90	166,67	55,56
10000	45	150	222,22	66,67
100000	300	500	333,33	200,00

Расчет рабочего расстояния проводился по закону Бугера-Ламберта-Бера, где интенсивность входящего потока (I_0) света и потока света на выходе ($I(l)$) заменена световой отдачей на входе (η_0) и на выходе ($\eta(l)$):

$$\eta(l) = \eta_0 \times e^{-\kappa \lambda l}$$

Где: κ_λ – показатель поглощения (не путать с безразмерным показателем поглощения κ , который связан с κ_λ формулой $\kappa_\lambda = \frac{4\pi\kappa}{\lambda}$, где λ – длина волны).
 Результаты расчетов для наиболее эффективных ОП представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Расчет расстояния работы эффективных осветительных приборов

Интенсивность входящего потока (световая отдача (Лм/Вт))	Расстояние (м)	$\kappa\lambda$ (на длине волны 494 мкм)	Интенсивность выходящего потока (световая отдача (Лм/Вт))	
200	0,1	0,027	199,46	
	0,5		197,32	
	1		194,67	
	1,2		193,62	
	1,4		192,58	
	1,5		192,06	
	1,6		191,54	
	1,8		190,51	
	2		189,49	
	2,2		188,47	
	2,4		187,45	
	2,5		186,95	
	↓		↓	↓
	19			119,74
	19,2			119,09
	19,4			118,45
	19,6			117,82
	19,8			117,18
	20			116,55
	20,2			115,92
	20,4			115,30
	20,6			114,68
20,8		114,06		
21		113,44		
21,2		112,83		
21,4		112,23		
21,6		111,62		
21,8		111,02		
22		110,42		
22,2		109,83		

Таблица 6 продолжение

Интенсивность входящего потока (световая отдача (Лм/Вт))	Расстояние (м)	кλ (на длине волны 494 мкм)	Интенсивность выходящего потока (световая отдача (Лм/Вт))	
222,22	0,1	0,027	221,62	
	0,5		219,24	
	1		216,30	
	1,2		215,14	
	1,4		213,98	
	1,5		213,40	
	1,6		212,82	
	1,8		211,68	
	2		210,54	
	2,2		209,40	
	2,4		208,28	
	2,5		207,72	
	↓		↓	↓
	22,6			120,72
	22,8			120,07
	23		119,42	
	23,2		118,78	
	23,4		118,14	
	23,6		117,50	
	23,8		116,87	
	24		116,24	
	24,2		115,62	
	24,4		114,99	
	24,6		114,37	
	24,8		113,76	
25		113,14		
25,2		112,54		
25,4		111,93		
25,6		111,33		
25,8		110,73		

Таблица 6 продолжение

Интенсивность входящего потока (световая отдача (Лм/Вт))	Расстояние (м)	кλ (на длине волны 494 мкм)	Интенсивность выходящего потока (световая отдача (Лм/Вт))
333,33	0,1	0,027	332,43
	0,5		328,86
	1		324,45
	1,2		322,70
	1,4		320,97
	1,5		320,10
	1,6		319,24
	1,8		317,52
	2		315,81
	2,2		314,11
	2,4		312,42
	2,5		311,57
	↓	↓	↓
	22,8		180,10
	23		179,13
	23,2		178,17
	23,4		177,21
	23,6		176,26
	23,8		175,31
	24		174,36
	24,2		173,42
	24,4		172,49
	24,6		171,56
	24,8		170,64
	25		169,72
	25,2		168,80
25,4		167,89	
25,6		166,99	
25,8		166,09	
26		165,20	

Проанализировав данные из таблицы можно сделать вывод, что системы, построенные на ОП со световой отдачей 200 Лм/Вт, 222 Лм/Вт и 333

Лм/Вт могут безошибочно работать на расстояния до 26 метров. В таком случае применение системы будет являться оправданным.

2.3 Черное море как возможный район применения

Для подробного изучения факторов и анализа на возможность применения Li-Fi систем было выбрано Черное море, так как оно является одним из самых изученных на данный момент морей, а его меромектические свойства представляют особый интерес так как могут стать основными факторами в вопросе использования данной технологии.

Основные характеристики Черного моря.



Рисунок 4 – Черное море

Чёрное море – внутреннее море бассейна Атлантического океана. Проливом Босфор соединяется с Мраморным морем, затем, через пролив Дарданеллы – с Эгейским и Средиземным морями, Керченским проливом соединяется с Азовским морем. В северной части акватории расположен Крымский полуостров. По поверхности Чёрного моря проходит водная граница между Европой и Азией.

Площадь Чёрного моря — 422 000 км² [18], максимальная глубина — 2210 м [19], протяжённость моря с севера на юг — 580 км, средняя — 1240 м. Общая длина береговой линии — 3400 км. Объём воды в море составляет 555 тыс. км³ [20].

Берега Чёрного моря изрезаны мало и, в основном, в северной его части. К крупным заливам относятся: Тендровский, Ягорлыцкий, Джарылгачский (принадлежат территории Украины), Каламитский, Каркинитский и Феодосийский (территория Крымского полуострова), Варненский, Бургасский (территория Болгарии), Синопский и Самсунский расположены на юге (территория Турции) [21]. Море омывает берега Украины, России, Болгарии, Румынии, Турции, Грузии, Абхазии.

В Чёрное море впадают крупные реки, к которым относятся: Дунай, Днепр, Днестр. Также впадают и более мелкие, например: Мзымта, Псоу, Бзыбь, Риони, Кодор, Ингури, Чорох, Кызылырмак, Ешилъырмак, Сакарья, Южный Буг, Камчия, Велека. Годовой речной сток в Чёрное море составляет около 310 км³, причём 80% этих вод выносятся на северо-западную шельфовую часть, в основном Дунаем и Днепром.

В Черном море расположено малое количество островов, самым крупным является остров Джарылгач, площадью 62 км². Остальные острова намного меньше, крупнейшие — Березань (площадь 0,362 км²) и Змеиный (0,205 км²).

Уникальность Черного моря проявляется также и в том, что оно является самым крупным в мире водоемом с несмешиваемыми слоями воды (меромектическим). Исследователи выделяют две большие массы воды: поверхностная и глубинная. Характеристики этих масс имеют сильные различия. Так, если поверхностный слой – опресненный, имеет температуру, близкую к воздуху, насыщен кислородом, то другой – глубинный, - не содержит кислорода, имеет гораздо большую соленость и плотность, приблизительно постоянную температуру. Уникальность этой вертикальной структуры состоит в том, что эти слои разделены другим слоем воды,

находящемся на глубинах от 30 до 100 м. Этот слой носит название ХПС (холодный промежуточный слой) и имеет свои собственные характеристики. Так, в этом слое температура всегда ниже, чем в глубоководных слоях. Это объясняется тем, что вода в ХПС не успевает прогреваться летом, после охлаждения зимой. Именно в ХПС наблюдаются и другие вертикальные изменения свойств воды (плотность, соленость, температура). Также ученые выделяют в Черном море ещё несколько слоев:

- Слой воды, где резко меняется температура (термоклин);
- Слой с быстрым изменением солености (галоклин);
- Слой с изменением плотности (пикноклин);
- Слой, в котором наблюдается резкий переход от аэробной к сероводородной зоне, а также изменения гидрохимических параметров (хемоклин).

Именно такое расслоение вод Черного моря по солености, температуре и плотности, создает определенный барьер для вертикального перемешивания вод и препятствует проникновению кислорода в сероводородные глубинные слои.

Рассмотрим Черное море с точки зрения показателя ослабления, так как этот показатель мы принимаем за основной – через него можно узнать остальные интересующие нас факторы. Для наглядности рассмотрим графическое представление.

Характер вертикального распределения показателя ослабления на разрезах обусловлен гидрологической структурой и динамикой вод. Для начала рассмотрим данные из [21].

На разрезе по $43^{\circ}30'$ через западный циклонический круговорот (рис. 5) такая связь наглядно проявляется на пограничном слое, положение которого связано с вертикальным распределением плотности воды. Глубина залегания этого слоя, в соответствии с куполообразной структурой изопики в циклоне, уменьшается от периферии к центральной части круговорота со 110 м до 90 м. В центре круговорота слой исчезает.

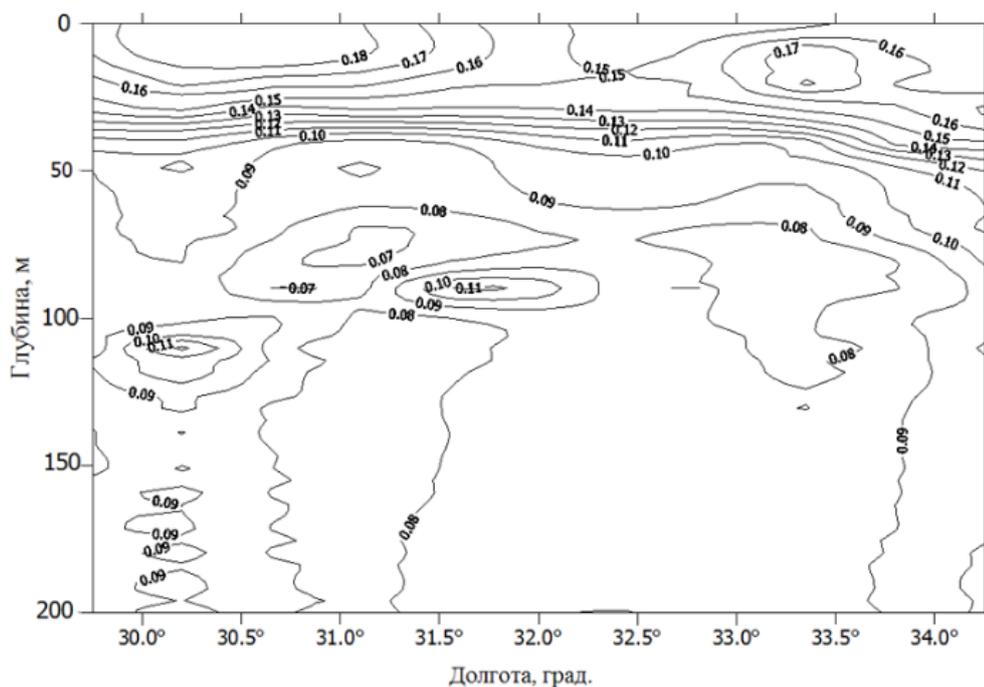


Рисунок 5 – Вертикальное распределение показателя ослабления направленного света K , $1/m$ ($\lambda=465$ нм) на разрезе по $43^{\circ}30'$ с.ш, через западный циклонический круговорот. Апрель 1989г, 21 пейс НИС «Профессор Колесников».

Аналогичная куполообразная картина положения по глубине пограничного, а также других оптических слоев, на вертикальном разрезе через море по широте $43^{\circ}00'$ видна на рис. 6 (июнь 1977 г., 15-й рейс НИС «Академик Вернадский»).

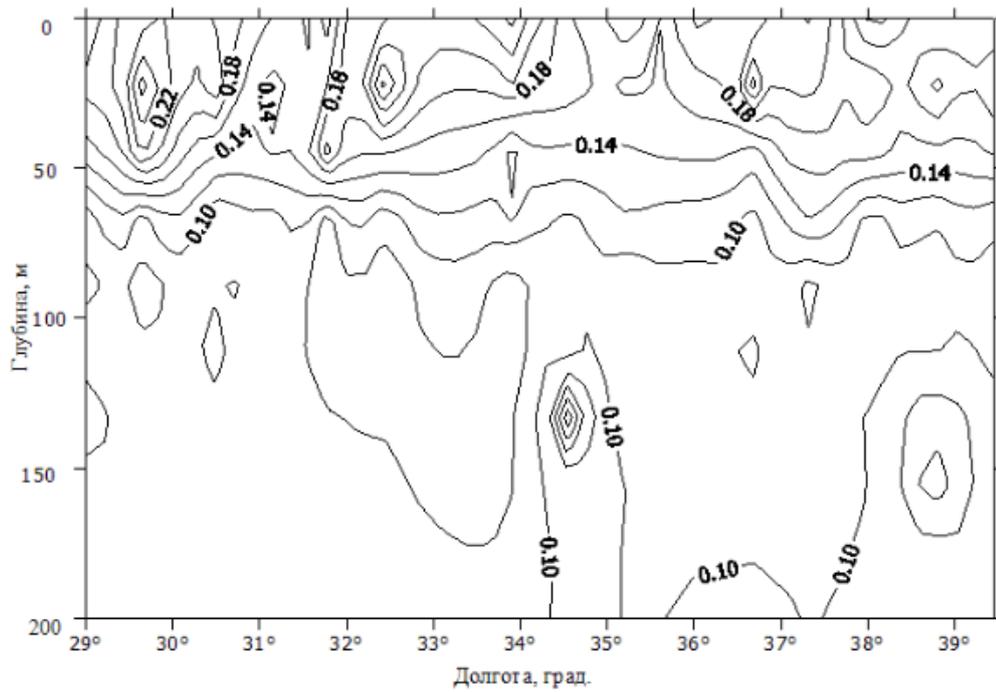


Рисунок 6 – Вертикальное распределение показателя ослабления направленного света ϵ , $1/m(\lambda=452 \text{ нм})$ на разрезе по $43^{\circ}00'$ с.ш. Июнь 1977 г., 15-й рейс НИС «Академик Вернадский».

На рис. 7 показано вертикальное распределение показателя ослабления на разрезе через антициклонический вихрь, образующийся около Крыма в результате меандрирования ОЧТ.

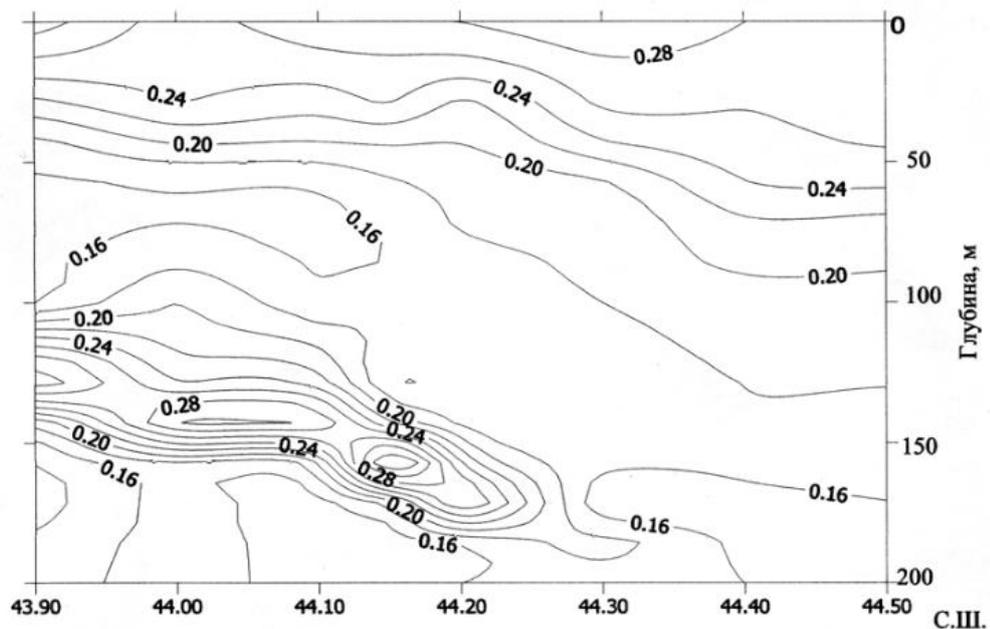


Рисунок 7 – Вертикальное распределение показателя ослабления направленного света ϵ , $1/\text{м}(\lambda=418\text{нм})$ на разрезе по $33^{\circ}15'$ в.д., через антициклонический вихрь около берегов Крыма. Декабрь 1994 г., 32-й рейс НИС «Профессор Колесников»

Динамическая топография вод в этом районе представлена на рис. 8. Пограничный мутный слой заглубляется от периферии вихря, где он находится на глубинах 120–140 м, к его центру до глубин 180–190 м.

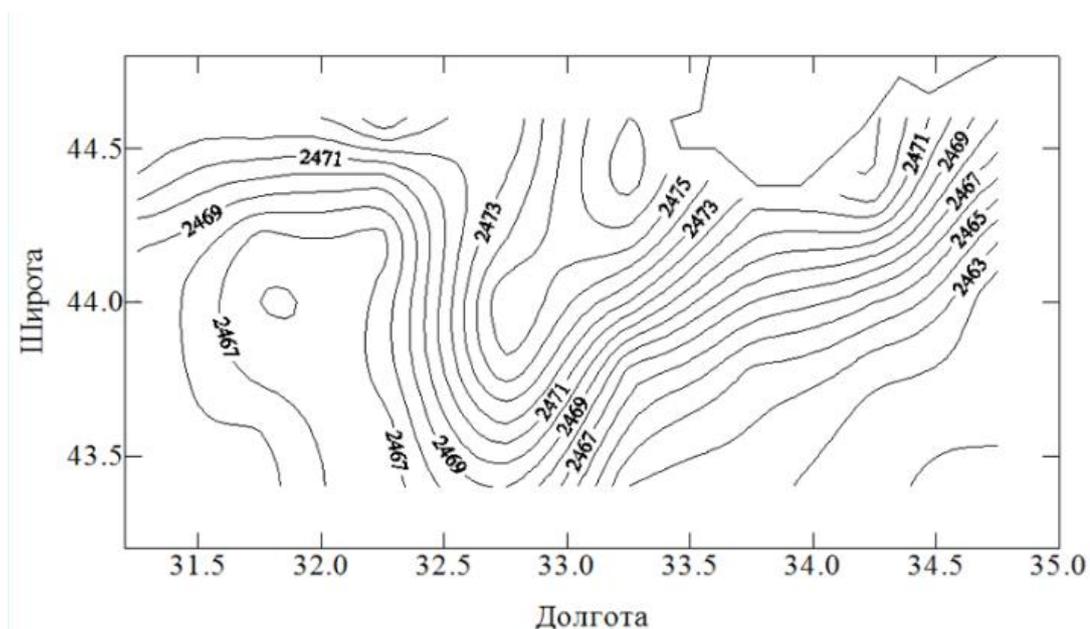


Рисунок 8 – динамическая топография поверхности вод на полигоне на глубине 5 м (динамические воды в сантиметрах относительно горизонта 300м). Декабрь 1994г., 32-й рейс НИС «Профессор Колесников»

В вертикальном распределении показателя ослабления на разрезе через основное черноморское течение около берегов Крыма (рис. 9), наблюдается характерное увеличение мощности пограничного слоя в ядре ОЧТ на $44^{\circ}00'$ с.ш.

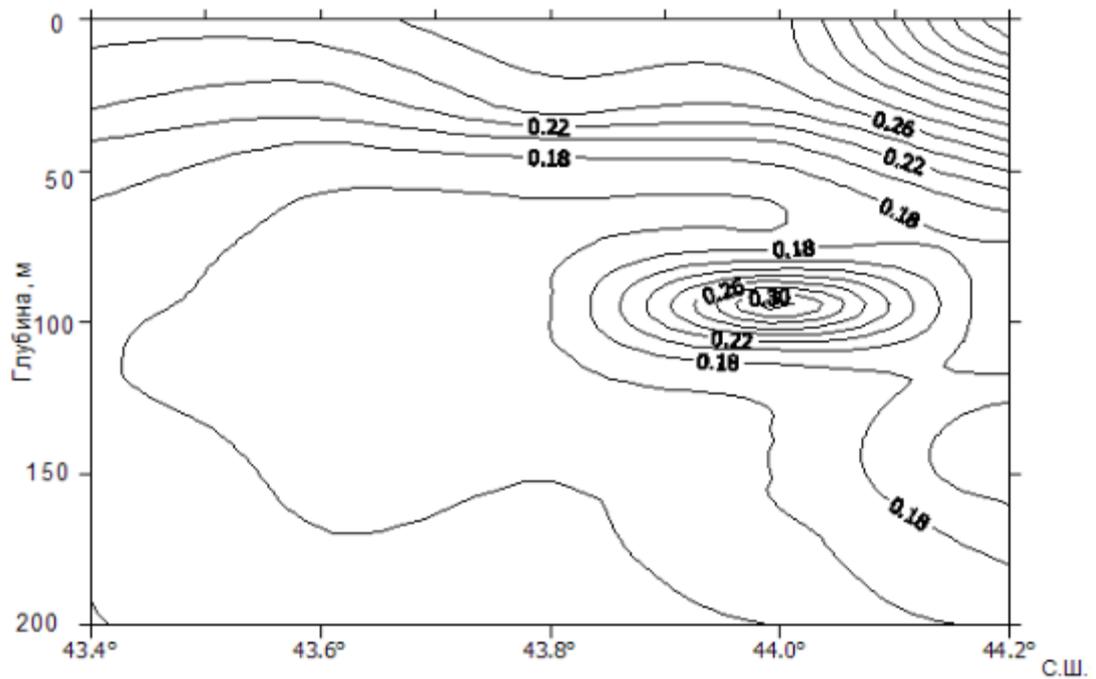


Рисунок 9 – Вертикальное распределение показателя ослабления направленного света ϵ , $1/m(\lambda=418 \text{ нм})$ на разрезе по $33^{\circ}45'$ в.д. через ОЧТ. Март 1995 г., 33-й рейс НИС «Профессор Колесников».

Так как основным слоем для проведения работ является поверхностный слой, необходимо не в последнюю очередь рассмотреть средние показатели для этого слоя. В качестве основных данных для анализа были использованы данные на глубине в 5-10 метров, собранные в ходе экспедиции НИС «Профессор Водяницкий» в разные периоды 2016 и 2017 гг.

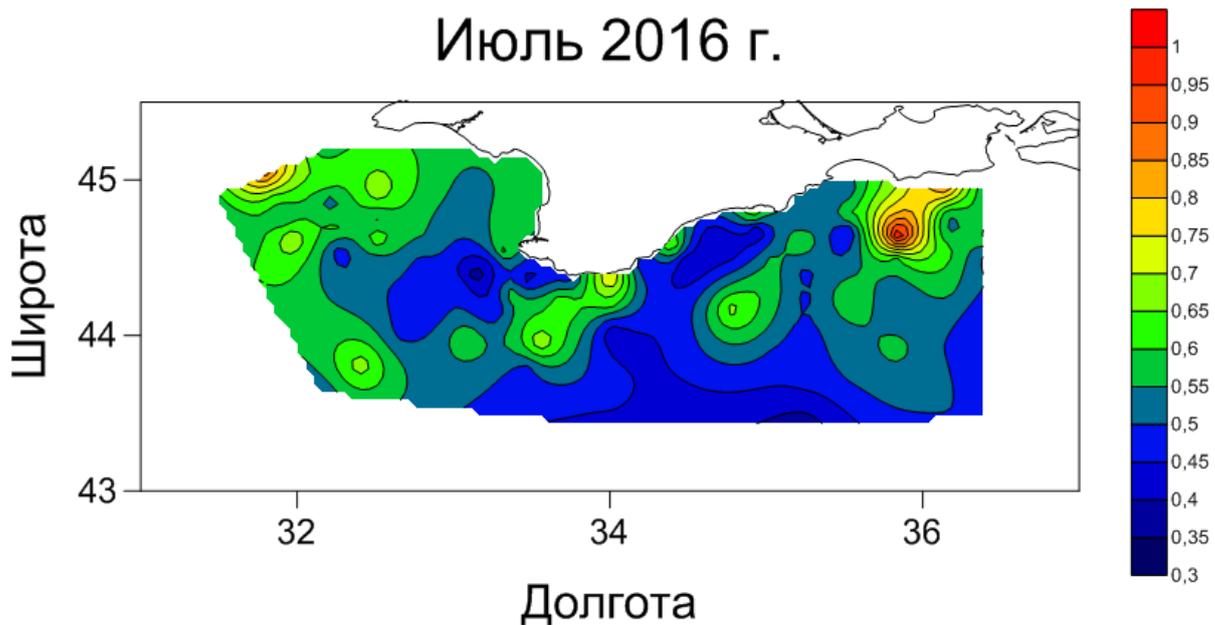


Рисунок 10 – Пространственное распределение показателя ослабления ϵ на глубинах 5-10 метров, $1/m(\lambda=460)$ Июль 2016г, НИС «Профессор Водяницкий».

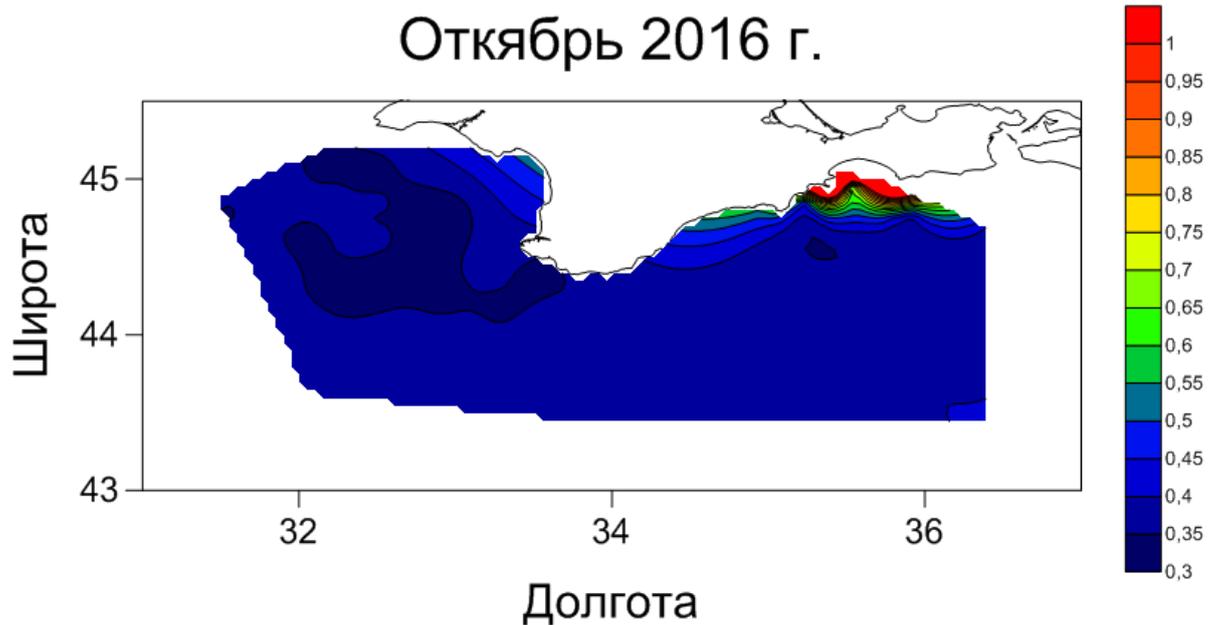


Рисунок 11 – Пространственное распределение показателя ослабления ϵ на глубинах 5-10 метров, $1/m(\lambda=460)$ Октябрь 2016г, НИС «Профессор Водяницкий».

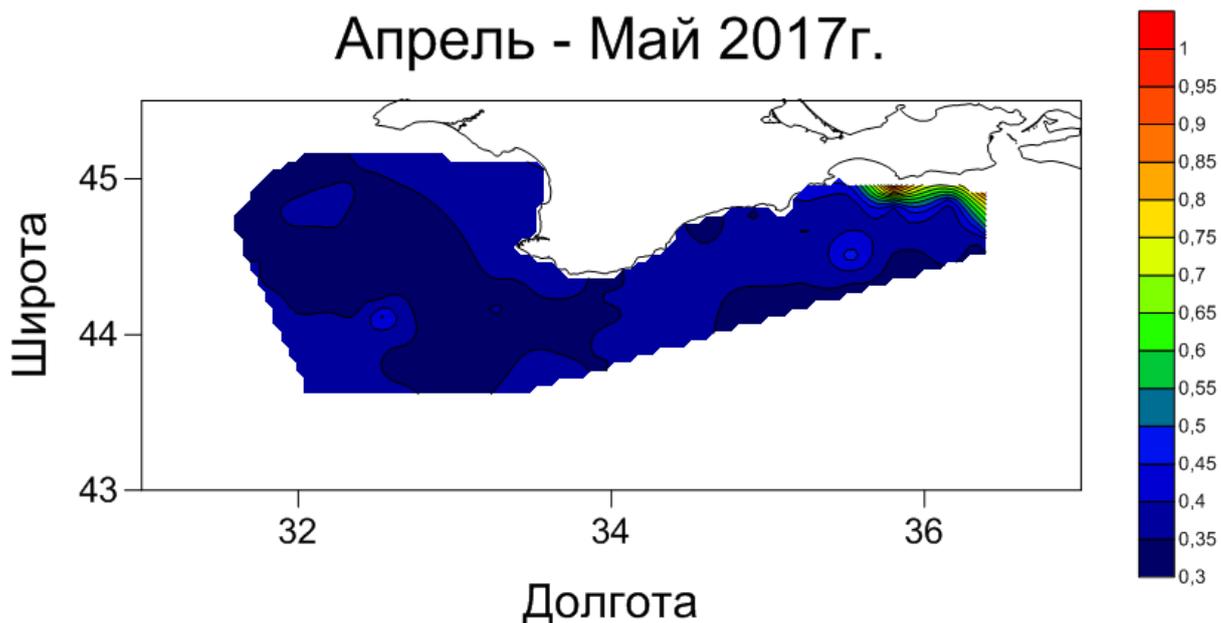


Рисунок 12 – Пространственное распределение показателя ослабления ϵ на глубинах 5-10 метров, $1/m(\lambda=460)$ Апрель-Май 2017 г., НИС «Профессор Водяницкий».

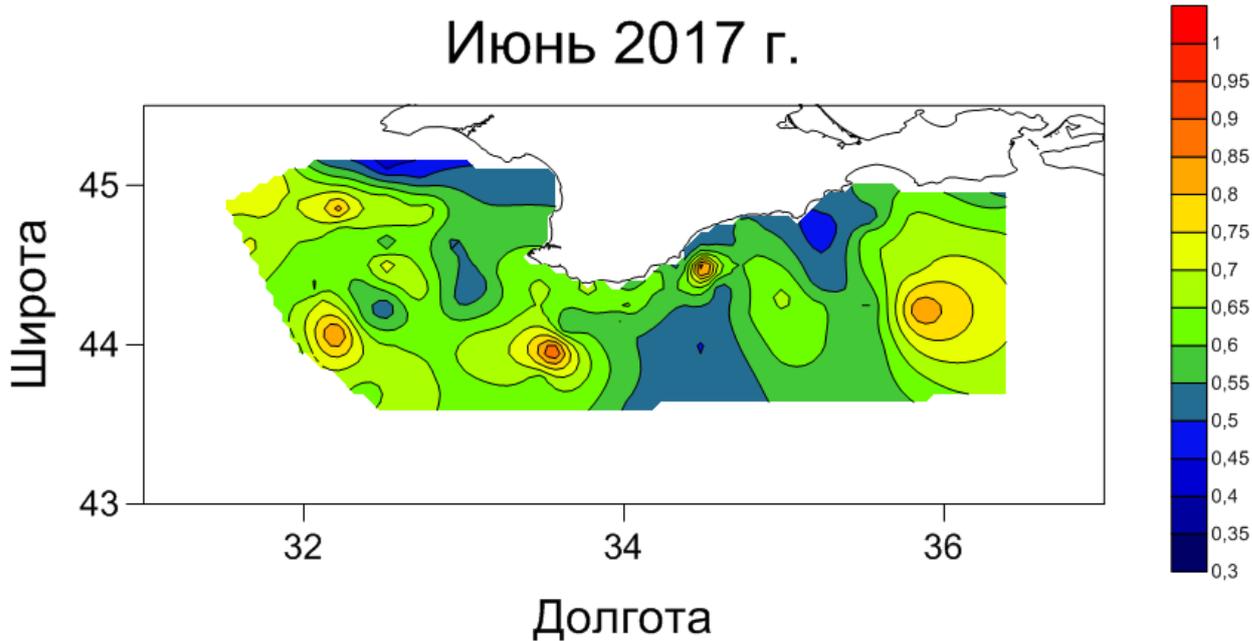


Рисунок 13 – Пространственное распределение показателя ослабления ϵ на глубинах 5-10 метров, $1/m(\lambda=460)$ Июнь 2017 г., НИС «Профессор Водяницкий».

Измерение показателя ослабления было так же произведено с длиной волны λ равной 625.

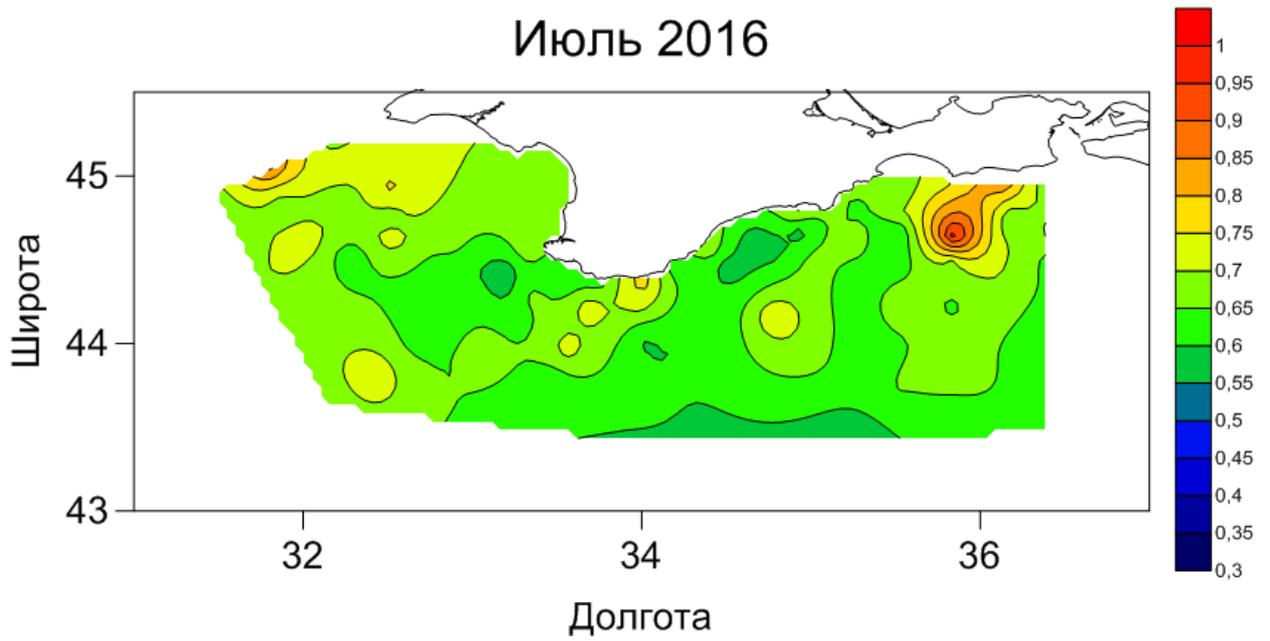


Рисунок 14 – Пространственное распределение показателя ослабления ϵ на глубинах 5-10 метров, $1/m(\lambda=625)$ Июль 2016г, НИС «Профессор Водяницкий».

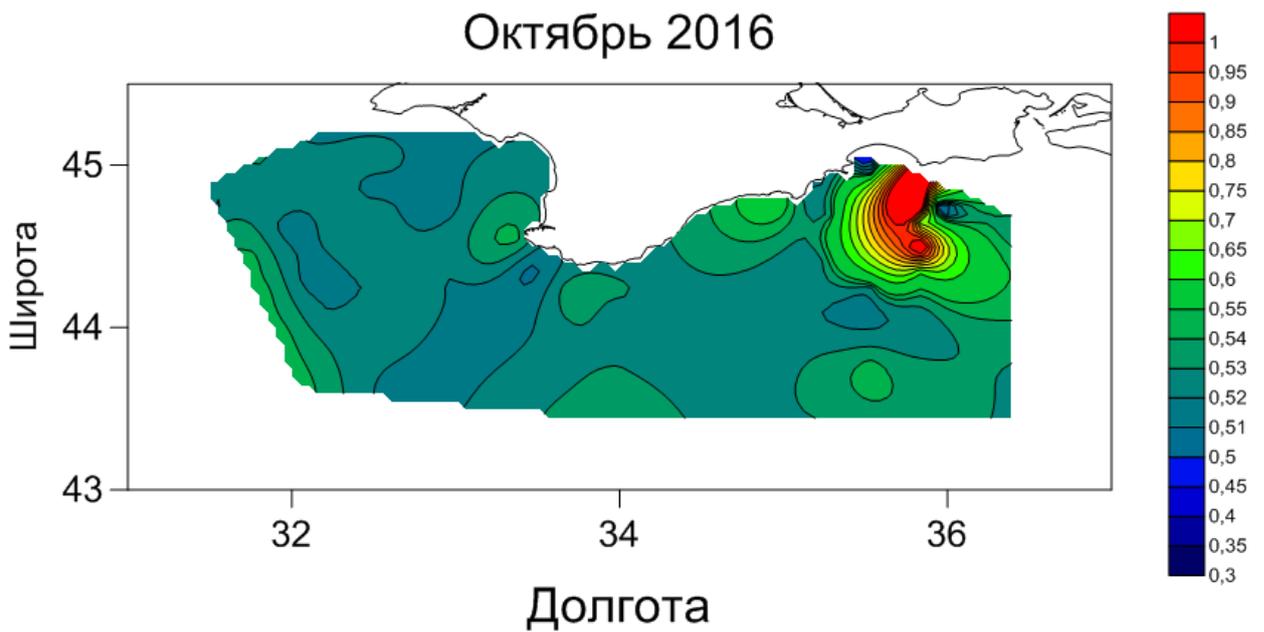


Рисунок 15 – Пространственное распределение показателя ослабления ϵ на глубинах 5-10 метров, $1/m(\lambda=625)$ Октябрь 2016г, НИС «Профессор Водяницкий».

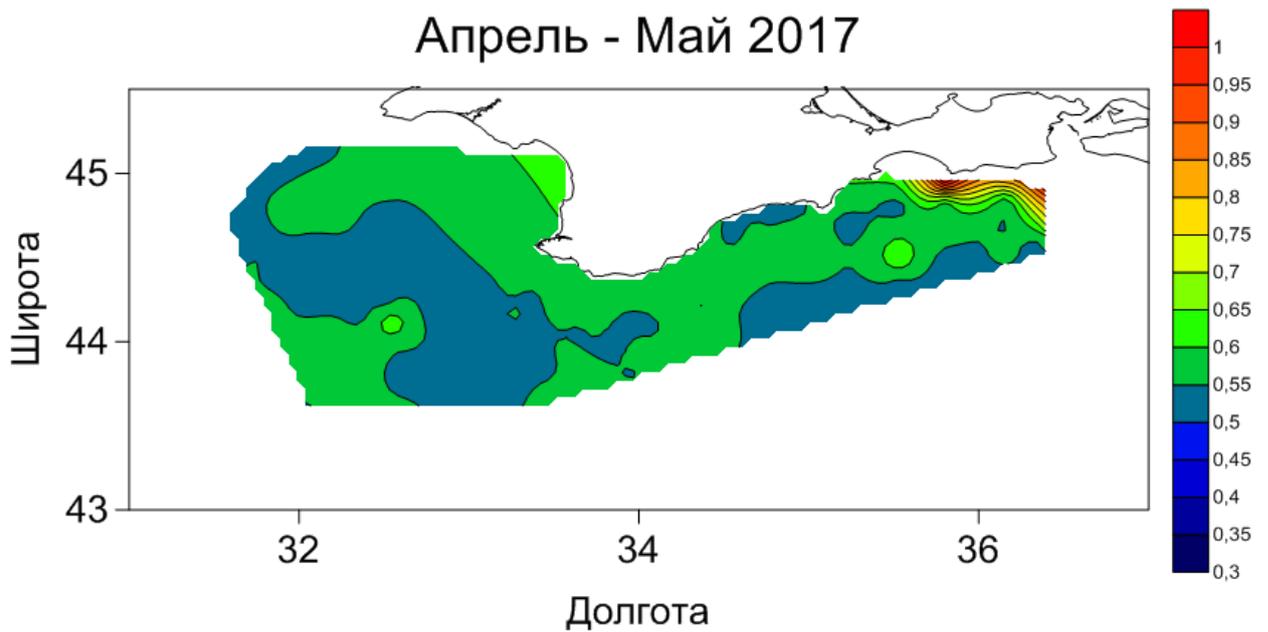


Рисунок 16 – Пространственное распределение показателя ослабления ϵ на глубинах 5-10 метров, $1/m(\lambda=625)$ Апрель-Май 2017 г., НИС «Профессор Водяницкий».

Период с середины апреля по середину мая не являлся периодом цветения водорослей, однако увеличение показателя ослабления в северо-восточной части полигона (рис. 9, рис. 13) связано с выносом мутных вод из Керченского пролива.

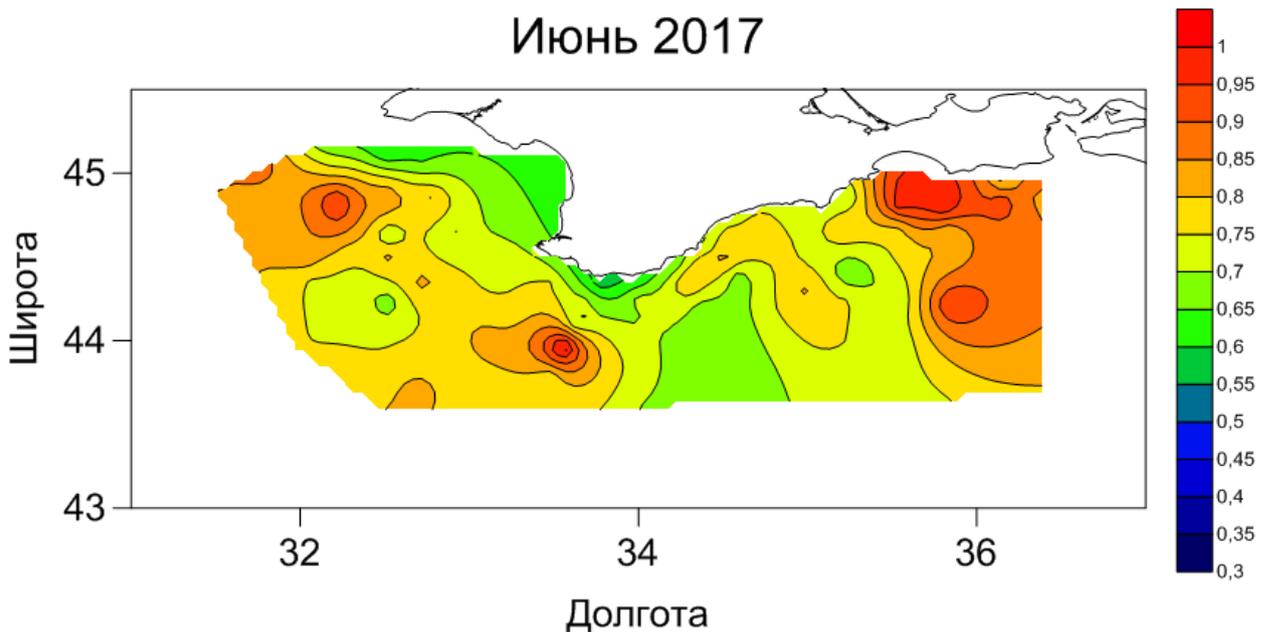


Рисунок 17 – Пространственное распределение показателя ослабления ϵ на глубинах 5-10 метров, $1/m(\lambda=625)$ Июнь 2017 г., НИС «Профессор Водяницкий».

Июнь 2017 года (рис. 17) следует рассматривать отдельно, потому как на период сбора данных в районе исследований происходило цветение кокколитофорид [22]. Они присутствуют в фитопланктоне глубоководной

части Черного моря в течение всего года и, как правило, значительное количество клеток этого вида наблюдается в фитопланктоне уже в мае, достигает пика численности в июне, а в июле отмечается фаза, завершающая «цветение» [23]. В процессе жизнедеятельности клетка несколько раз сбрасывает известковые пластины – кокколиты, что приводит к многократному возрастанию количества крупной минеральной взвеси в воде и, как следствие, к увеличению рассеяния света без существенного увеличения поглощения. Слабая спектральная селективность рассеяния на крупных частицах приводит к тому, что вода приобретает характерный белесый оттенок, по которому цветение кокколитофорид можно обнаружить визуально. Рост же рассеяния назад приводит к увеличению восходящей яркости моря и показателя ослабления направленного света. Таким образом, можно сказать, что в июле 2017 года (рис. 14) наблюдается лишь остаточное явление после цветения.

На всех представленных пространственных распределениях высокий показатель ослабления направленного света отмечается в северо-восточной части полигона. Во всех случаях это связано с переносом вод из Керченского пролива и взмучиванием вод.

Для прибрежных зон были проведены экспедиции на НИС «Бирюза». Длина волны λ при измерениях равна 460.

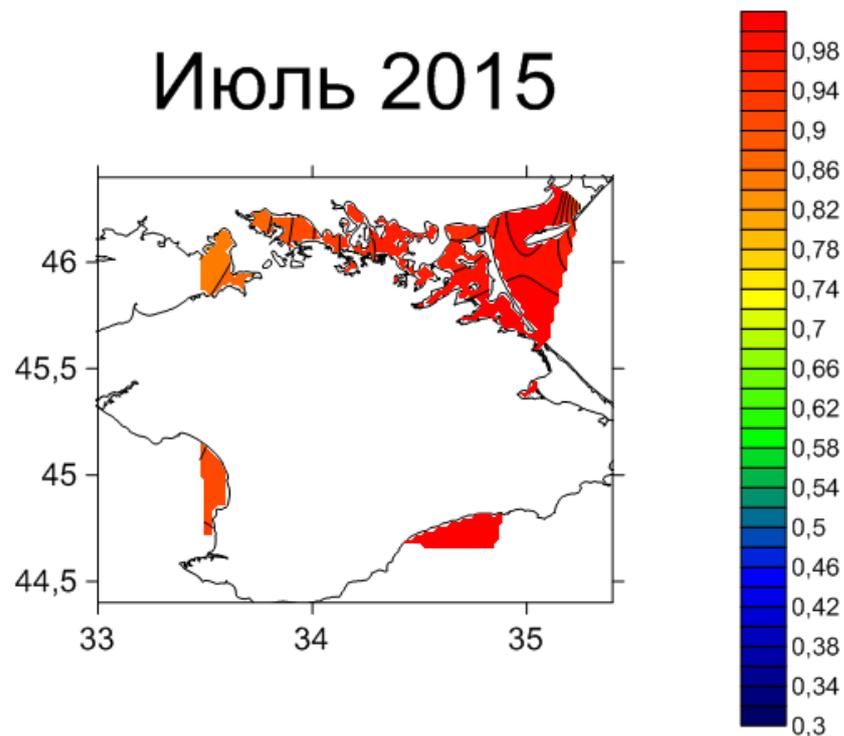


Рисунок 18 – Пространственное распределение показателя ослабления ϵ на глубинах 5-10 метров, $1/m(\lambda=460)$ Июль 2015 г., НИС «Бирюза».

Высокий показатель ослабления в районах, где проводились исследования в июле 2015 (рис. 14), связаны со сточными водами и замутнением воды остатками продуктов цветения описанных ранее.

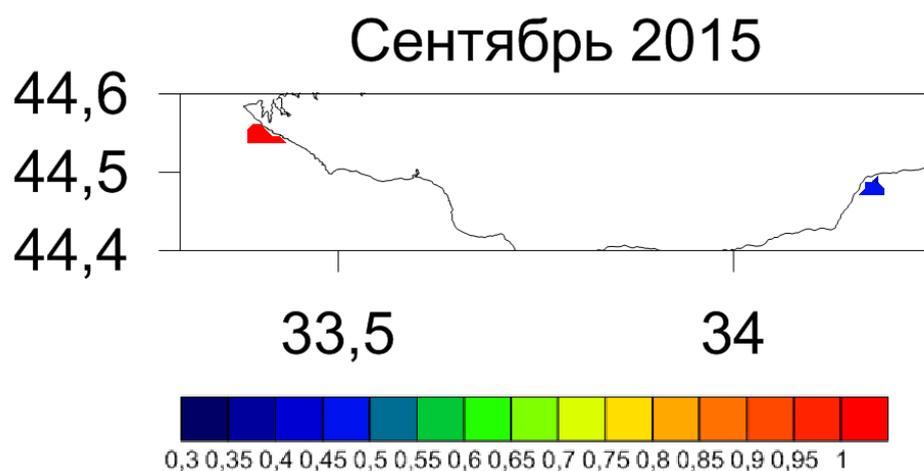


Рисунок 19 – Пространственное распределение показателя ослабления ϵ на глубинах 5-10 метров, $1/m(\lambda=460)$ Сентябрь 2015 г., НИС «Бирюза».

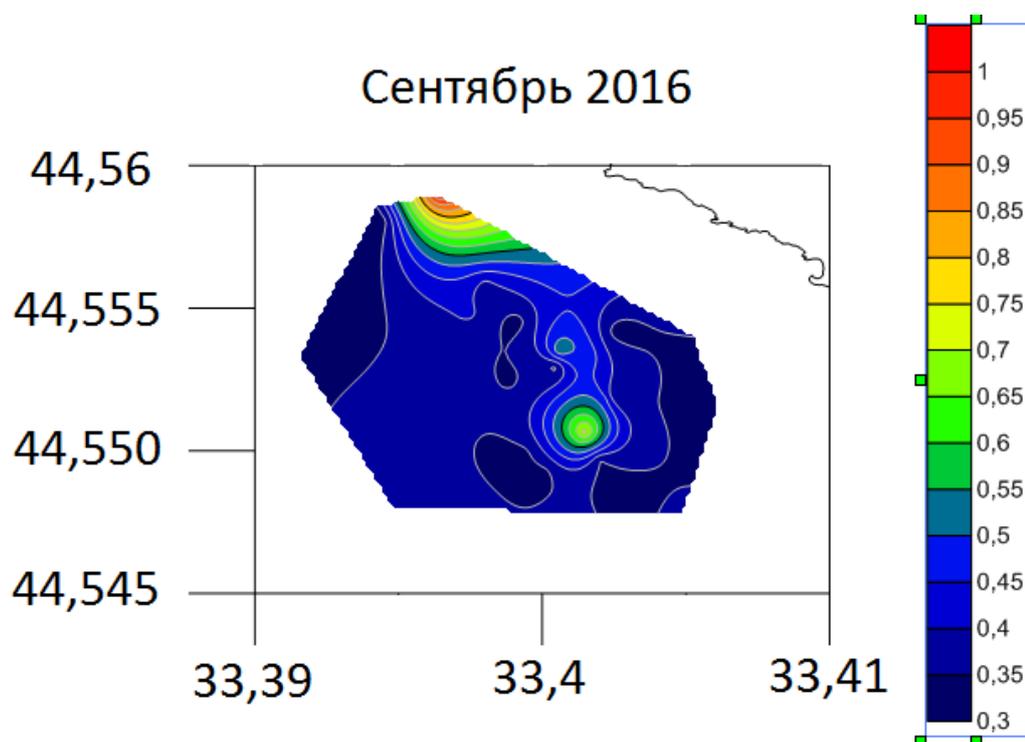


Рисунок 20 – Пространственное распределение показателя ослабления ϵ на глубинах 5-10 метров, $1/m(\lambda=460)$ Сентябрь 2016 г., НИС «Бирюза».

На всех представленных пространственных распределениях высокий показатель ослабления направленного света отмечается в северо-восточной части полигона. Во всех случаях это связано с переносом вод из Керченского пролива и взмучиванием вод. В остальных случаях высокий показатель связан или с цветением вод и остаточным продуктом цветения, или с приближенностью к районам сброса сточных вод.

Таким образом, можно сделать вывод, что технология Li-Fi может применяться везде, где возможно распространение света. Качество же сигнала и возможности передачи данных будет зависеть в первую очередь от показателя ослабления направленного света.

Глубины, на которых могут быть использована Li-Fi технологии определяются не только показателем ослабления, но также и термоклинном – на его уровне наблюдается типичный слой мутности. Вследствие этой особенности, использование системы будет наиболее эффективным. до и после него (на глубинах до и после 10-20 метров)

При выборе осветительного прибора (диода) необходимо учитывать мощность его светового излучения через определение ослабления света при распространении в поглощающей среде через закон Бугера-Ламберта-Бера. Определение мощности поможет вычислить дальность на которую будет работать система и на каком расстоянии начнется ослабление сигнала.

Вывод

Особенности работы системы в водной среде обуславливаются наличием определенных оптико-физических свойств воды. В качестве основных особенностей и возможных препятствий на пути использования Li-Fi систем выделяются показатели ослабления, поглощения, рассеяния и состав водной среды (неорганические соли, растворенные органические соединения, планктон, бактерии, неживая органическая взвесь – детрит, минеральные частицы). Однако, среди всех показателей следует выделить основной. Такой характеристикой может являться показатель ослабления, так как показатели поглощения и рассеяния можно рассчитать математически, основываясь на показателе ослабления.

В качестве показателей эффективности нужно в первую очередь рассматривать расстояние, при котором потери в передаче данных будут минимальны. Также следует учитывать, какой спектр будет использован для передачи данных. Оба этих фактора целиком и полностью зависят от оптических свойств воды.

Коэффициент поглощения - безразмерная физическая величина, характеризующая способность тела поглощать падающее на него излучение.

Самый высокий коэффициент поглощения (0,320) принадлежит красной части спектра электромагнитного излучения (рис.4), а самый низкий коэффициент (0,002) принадлежит синей части спектра. Таким образом, можно сделать вывод, что, используя свет излучения синего спектра, мы получим минимальные потери в оптических свойствах поглощения света водой. Для такого света может быть использована LED лампа с фосфорным покрытием, потому что она излучает синий свет. Очевидно, что использование

красного светового спектра не является эффективным, так как при его использовании водой будет поглощено значительное количество света.

Показатель ослабления – величина, обратная расстоянию L , на котором поток монохроматического излучения F , распространяющегося в воде в виде параллельного пучка, ослабляется в результате суммарного действия поглощения и рассеяния в десять раз при десятичном основании или в e раз при натуральном основании.

На показатель ослабления оказывают влияние биологические параметры морской воды (растворенное органическое вещество и взвесь). В результате распада органических веществ образуются гуминовые соединения, имеющие желтый цвет. Такое явление увеличивает поглощение света, что приводит к тому, что показатель ослабления направленного света увеличивается. Растворенную органику могут производить планктон, рыбы и другие подводные организмы. Так же органику может приносить в море через стоки рек и канализационные сооружения.

В случае с инфракрасным излучением следует учитывать несколько другие факторы. Оптические свойства веществ (прозрачность, коэффициент отражения, коэффициент преломления) в инфракрасной области спектра, как правило, значительно отличаются от оптических свойств в видимой и ультрафиолетовой областях. Многие вещества, прозрачные в видимой области, оказываются непрозрачными в некоторых областях инфракрасного излучения и наоборот. Непрозрачной вода для ИК излучения становится из-за высокой степени поглощения света водой. Во-вторых, система на инфракрасном излучении может перестать работать при помещении самого инфракрасного диода в корпус из недостаточно прозрачного для излучения материала – не все виды оргстекла могут стать удачным решением для корпуса системы.

Рабочим расстоянием принято считать расстояние, пройденное лучом света через толщу воды при котором интенсивность выходного светового

потока будет больше или равна половине интенсивности входного потока. Расстояние рассчитывается по формуле закона Бугера-Ламберта-Бера.

Проанализировав данные из таблицы 6 можно сделать вывод, что системы, построенные на ОП со световой отдачей 200 Лм/Вт, 222 Лм/Вт и 333 Лм/Вт могут безошибочно работать на расстояния до 26 метров. В таком случае применение системы будет являться оправданным.

Глубины, на которых могут быть использована Li-Fi технологии определяются не только показателем ослабления, но также и термоклинном – на его уровне наблюдается типичный слой мутности. Вследствие этой особенности, использование системы будет наиболее эффективным. до и после него (на глубинах до и после 10-20 метров)

При анализе данных о показателе ослабления в Черном море, можно сделать вывод, что технология Li-Fi может применяться во всех глубоководных районах. Качество же сигнала и возможности передачи данных будет зависеть в первую очередь от показателя ослабления направленного света.

3 ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ LI-FI ДЛЯ РАБОТЫ В ВОДНОЙ СРЕДЕ

Качественно построенная система прослужит долго и будет выполнять свои задачи без каких-либо поломок. В этой главе рассмотрены цели и задачи системы, схема и разобраны возможные рекомендации к конструированию систем передачи данных на основе Li-Fi

3.1 Теоретическое представление системы: цели и задачи

Как и любая другая система, Li-Fi система должна иметь свои цели и задачи. Целью системы служит передача данных под водой. Под передачей данных может иметься в виду как передача собранной информации аппаратом, так и возможность дистанционного управления аппаратом. Для этих целей приемник и передатчик должны быть направлены в сходное положение и по возможности так, чтобы сигнал не встречал помех. Несмотря на то, что система с LED сигналом в теории может прекрасно работать и с наличием препятствий и помех, система, работающая на инфракрасном излучении помех не терпит и имеет большее количество несовершенств. Таким образом и формируется задача системы – обеспечение передачи данных или управления без потерь, которые могут произойти в результате появления помех.

Построение и схема системы должны полагаться на цели и задачи. В данной работе, основным фактором, влияющим на построение системы, будет являться то, что использование аппарата с Li-Fi будет происходить под водой, а значит, все особенности применения так же будут связаны с водной средой. Особенности водной среды будут рассмотрены ниже.

Как уже было сказано ранее, система в общем виде представляет собой передатчик и приемник в виде фотодетектора, которые связываются друг с другом через световой канал – передатчик модулирует сигнал, переданный с аппарата или ЭВМ, и передает его на осветительный прибор, который начинает передачу сигнала согласно выбранному способу кодирования в виде мерцания с определенной частотой. Фотодетектор в приемнике «узнает»

сигнал, начинает его декодировать и предоставляет в начальном виде оператору ЭВМ к которому была подключена система.

В случае если рассматривается двунаправленная система, обе стороны обеспечиваются как приёмниками, так и передатчиками сигнала. Одним из преимуществ такой системы может служить то, что сигнал от одного передатчика может быть получен сразу несколькими приемниками. Такое преимущество можно использовать в случае, когда возможно появление преград или помех на фоне использования, что существенно увеличивает эффективность работы системы.



Рисунок 21 – блок схема Li-Fi системы.

Рассмотрим блок-схему системы (рисунок 21). Введенные данные сначала преобразуются в двоичный код через аналогово-цифровой преобразователь, а затем подаются в светодиодную схему модулятора, которая управляется сигнальным процессором. Светодиодный модулятор работает на модуляции включения-выключения [24]. После этого светодиод высокой освещенности мигает с высокой скоростью и передает данные в виде оптических импульсов по беспроводному каналу. На стороне приемника эти

оптические импульсы интерпретируются фотоприемником в электрический сигнал, который усиливается транзисторным усилителем, а затем преобразуется обратно в двоичные данные с помощью компаратора.

3.2 Схема системы

Задача передатчика заключается в том, чтобы он преобразовывал цифровые данные в видимый свет – общая идея модуляции состоит в том, чтобы передавать данные меняя интенсивность света и сделать тот или иной световой сигнал соответствующим с определенным символом [25]. Порты Arduino (рисунок 22) не способны поставлять нужное количество тока, чтобы сделать интенсивность света сильной и достаточно быстрой. Чтобы обойти эту проблему, в качестве переключателя используется транзистор, что позволило быстрее переключать больший ток.



Рисунок 22 – микроконтроллер Arduino UNO.

На рисунке 23 показана схема, дающая обзор передатчика. Печатная плата для передатчика конструируется следующим образом:

- Конструкция печатной платы передатчика создается путем преобразования принципиальной схемы цепи в план печатной платы. Программное обеспечение, используемое для компоновки печатных плат – Cadsoft Eagle;

- Разработка топологии печатной платы происходит по лазерно-утюжной технологии;
- После этого медная плата отрезана для монтажной платы. Также верхний оксидный слой стирается;
- После этого, печатная плата переносится на медную плату;
- Далее схема из бумаги выглаживается на печатной плате утюгом для переноса изображения;
- Далее следует выравнить плату;
- После этого травитель осторожно размещается на плате, после чего плату очищают от остатков;
- Компоненты припаиваются.

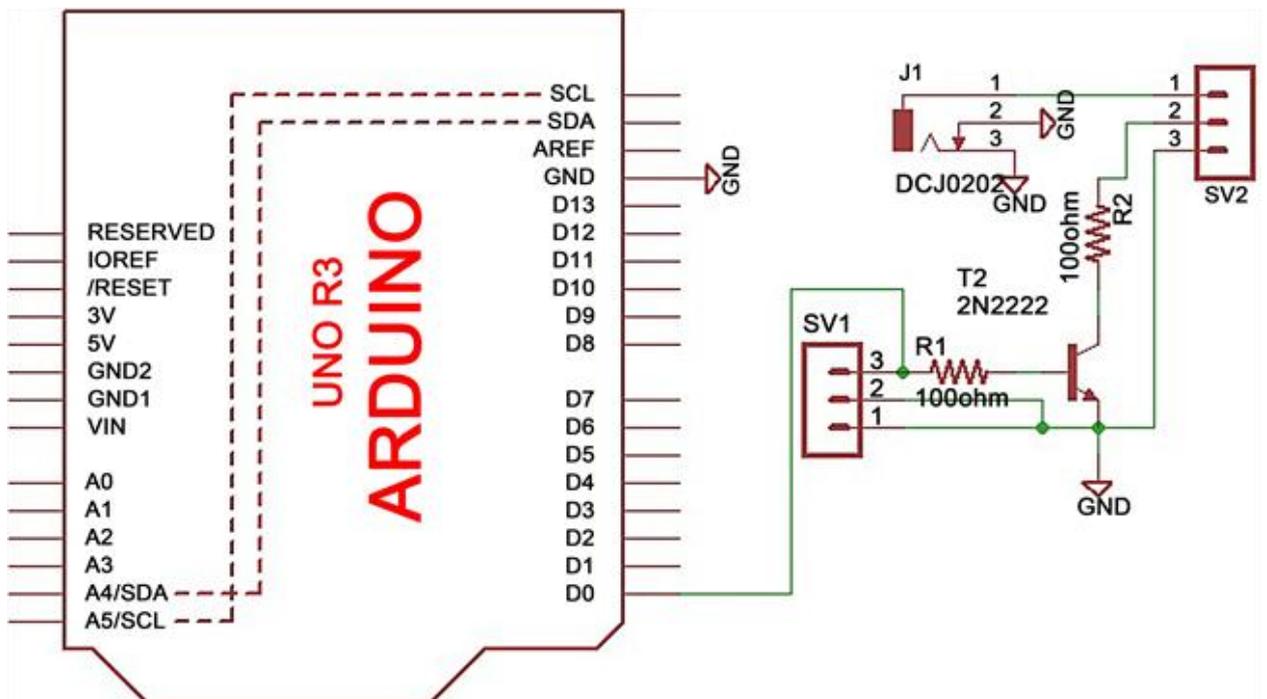


Рисунок 23 – Схема Li-Fi передатчика.

Аппаратная конструкция приемника существенно отличается от конструкции передатчика. Основная задача приемника – преобразовать входящий свет в ток с помощью фотодиода (фотоприемник). Основная конструкторская особенность Arduino состоит в том, что плата не может

принимать цифровой сигнал напряжением выше 5 В. Поэтому электрическая цепь между фотодиодом и Arduino должна обрабатывать электрический сигнал таким образом, чтобы его можно было правильно интерпретировать. Электронные компоненты приемника должны преобразовывать ток в напряжение чтобы усилить и сравнить его. Расстояние между передатчиком и приемником может быть изменено, но во избежание слишком малого или слишком высокого сигнала может быть разработан автоматический регулятор усиления (AGC), вместо этого здесь используется переменный резистор. Этот компонент усиливает или уменьшает входное напряжение до выбранного выходного напряжения. Чтобы убедиться, что сигнал является цифровым и стабильным перед Arduino, в примере используется компаратор Op-Amp. Схема приемника показана на рисунке 24.

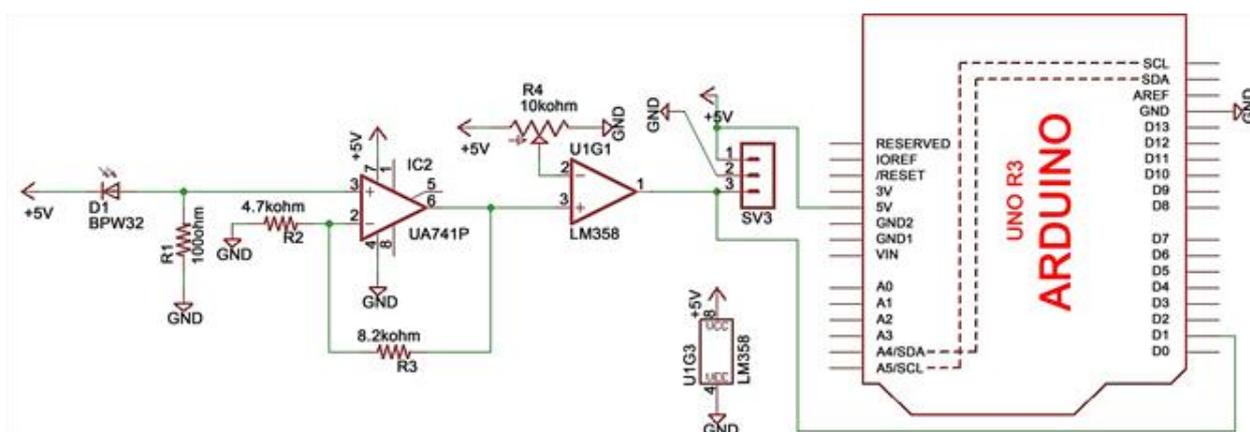


Рисунок 24 – схема Li-Fi приемника.

Программная реализация комплекса состоит из следующих отдельных частей:

- упаковка данных;
- аппаратное управление;
- синхронизация передачи;
- кодирование и декодирование передачи;
- обработка ошибок.

Всякий раз, когда пользователь хочет отправить данные другому пользователю, программный комплекс, например, с помощью языка Java, будет выполнять следующие шаги:

- 1) приложение, используемое пользователем, уведомит операционную систему (ОС) о том, что оно хочет отправить данные, какие данные, и куда его следует отправить.
- 2) Кэрнелъ возьмет данные и передаст их сетевому модулю.
- 3) Сетевой модуль буферизует его и начнет передавать по каналу.
- 4) Сетевой модуль на принимающем компьютере соберет пакет с канала и передаст его кэрнелъ принимающего компьютера.
- 5) Если данные предназначены для приложения, например, веб-браузера, данные будут переданы этому приложению.

Таким образом система будет выполнять свои задачи.

Собранная система будет функционировать как в водной среде, так и вне ее. Эффективность работы системы будет зависеть в первую очередь от осветительного прибора, а также от метода обработки и передачи данных. Способы шифровки и дешифровки данных в первую очередь зависят от разработчика системы, а также от задачи, которую система решает.

Также важен способ модуляции сигнала. На данный момент самыми подходящими для использования в технологиях Li-Fi являются три популярных оптических метода мультиплексирования с ортогональным частотным разделением (OFDM), таких как оптический OFDM с постоянным током (DCO-OFDM), асимметрично обрезанный оптический OFDM (ACO-OFDM) и униполярный OFDM (U-OFDM) для подводных оптических систем беспроводной связи[26].

Множественный доступ с частотным разделением на одну несущую (SC-FDMA) может достигать более низкого отношения пиковой и средней мощности, чем OFDM, что может быть полезно и для подводной оптической

беспроводной связи [27,28,29,30]. Поскольку светодиод является устройством с ограниченной полосой частот, модуляция с несколькими несущими более подходит для светодиодных систем UOWC. Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM) является ключевым методом беспроводной связи 4G, который также широко используется во многих приложениях.

В настоящее время оптический OFDM привлек много внимания, как в академических кругах, так и в промышленности [31 , 32 , 33]. Не так давно было много популярных оптических методов OFDM, таких как DC-смещенный оптический OFDM (DCO-OFDM), асимметрично обрезанный оптический OFDM (ACO-OFDM) и униполярный OFDM (U-OFDM) [34, 35, 36]. Во избежание отрицательных сигналов, DCO-OFDM добавляет смещение DC к первоначально двухполярным однозначным сигналам OFDM. Однако, поскольку сигналы постоянного тока не могут полностью избавиться от информации с отрицательным значением, сигналы при нуле должны быть жестко обрезаны. ACO-OFDM и U-OFDM – недавно предложенные оптические методы OFDM для модуляции интенсивности и систем обнаружения [35]. Для ACO-OFDM для модуляции данных используются только нечетные частотные поднесущие, а четные частотные поднесущие установлены в ноль. Таким образом, нулевые эффекты отсечения могут только ввести помеху на четных поднесущих [37]. В U-OFDM, значения положительной и отрицательной информации переданы подряд; поэтому, никакое zero искажение отсечения.

Подводный оптически OFDM привлекал много внимания исследования недавно в виду того что OFDM метод выбранного для того чтобы обеспечить высокоскоростную передачу. Предложена соответствующая работа на основе подводно-оптического OFDM [40, 28, 29]. Исследователи представили экспериментальную демонстрацию, чтобы показать, что подводный OFDM может поддерживать скорость передачи данных до 15,36 Мбит / с для передачи

4 на четыре метра совершенно без потерь, когда полоса пропускания светодиода составляет 10 МГц [40]. Используя двухступенчатый лазерный диод с длиной волны 405 нм с инжекционной блокировкой, скорость передачи данных может достигать нескольких гигабит в секунду [39].

Поскольку источники света для оптической беспроводной связи нелинейны и имеют ограниченную мощность, следует учитывать отсечение как нулевой, так и пиковой мощности.

3.3 Рекомендации к использованию

Как и говорилось ранее, построенную систему можно использовать для разных целей, не только как систему передачи данных в воздушной среде, но и как систему для работы в водной среде.

Как было сказано ранее, одной из основных областей использования рассматривается океанологические и океанографические исследовательские комплексы, включающие в себя автономные необитаемые подводные аппараты применения, которых связано с изучением труднодоступных областей, таких как подледные исследования, или изучение районов с разнообразным рельефом, где применение телеуправляемых аппаратов и аппаратов, поддерживающих связь через спутники было бы затруднительным.

Районы применения ограничиваются только оптическими свойствами воды – показатель ослабления и показатель поглощения являются основными факторами на которые следует обращать внимание. Но даже при не самых благоприятных показателях в определенной мере работу прибора можно компенсировать работой осветительных приборов. Не смотря на то, что рабочее расстояние не представляет собой километры, расстояние в 25 метров для работы Li-Fi без потерь является достаточным что бы назвать эту технологию передачи данных применимой для работы в водной среде.

На сегодняшний день нет никаких точных рекомендаций относительно конструирования системы – каждый инженер решает сам, как ему строить

систему с применением технологии Li-Fi. Отсутствие точных рекомендаций связано с тем, что данная технология является относительно новой, и не все еще достаточно убеждены в работоспособности системы, потому и построенные системы в основном являются экспериментальными, но это утверждение является достоверным для систем, чья задача работать в подводных условиях. Что же касается систем, предназначенных работать в воздушной среде – таких систем досочно много. По их принципу следует начать разработку систем для работы под водой.

В качестве самого яркого представителя на рынке Li-Fi следует упомянуть компанию PureLiFi [41], чья деятельность уже «плотно» запомнилась многим исследователям. Основанная в 2012 году, PureLiFi является побочным продуктом Эдинбургского университета, где его новаторские исследования в области Li-Fi находятся в разработке с 2008 года.

Стоит отметить, что системы Li-Fi не обязательно должны нести встраиваемый характер. Модульный аппарат будет намного удобней в применении если изначально подводный аппарат был создан для других целей. В случае конструирования системы модульного типа необходимо в первую очередь убедиться, что система прибора поддерживает такое вмешательство. Конечно, большая часть проблем будет доступна к решению, если инженер, конструирующий систему будет знать все о том, как работает аппарат-носитель. В таком случае создать систему Li-Fi связи, подходящую к конкретному аппарату будет намного проще – вопросы питания и интеграции в систему аппарата будет решен.

Таким же образом можно создать универсальный модуль, который будет работать вне зависимости от системы самого аппарата, и иметь характер носителя.

В целом, можно сказать что система имеет большой потенциал, и судьба этой системы только в руках конструктора и дальнейшего пользователя.

Вывод

Как и любая другая система, Li-Fi система должна иметь свои цели и задачи. Целью системы служит передача данных под водой. Под передачей данных может иметься в виду как передача собранной информации аппаратом, так и возможность дистанционного управления аппаратом. Для этих целей приемник и передатчик должны быть направлены в сходное положение и по возможности так, чтобы сигнал не встречал помех. Несмотря на то, что система с LED сигналом в теории может прекрасно работать и с наличием препятствий и помех, система, работающая на инфракрасном излучении помех не терпит и имеет большее количество несовершенств. Таким образом и формируется задача системы – обеспечение передачи данных или управления без потерь, которые могут произойти в результате появления помех.

Как уже было сказано ранее, система в общем виде представляет собой передатчик и приемник в виде фотодетектора, которые связываются друг с другом через световой канал – передатчик модулирует сигнал, переданный с аппарата или ЭВМ, и передает его на осветительный прибор, который начинает передачу сигнала согласно выбранному способу кодирования в виде мерцания с определенной частотой. Фотодетектор в приемнике «узнает» сигнал, начинает его декодировать и предоставляет в начальном виде оператору ЭВМ к которому была подключена система.

Построена схема системы рассмотрены основные типы оптической модуляции: оптический OFDM с постоянным током (DCO-OFDM), асимметрично обрезанный оптический OFDM (ACO-OFDM) и униполярный OFDM (U-OFDM) для подводных оптических систем беспроводной связи.

На сегодняшний день нет никаких точных рекомендаций относительно конструирования системы – каждый инженер решает сам, как ему строить систему с применением технологии Li-Fi. Отсутствие точных рекомендаций связано с тем, что данная технология является относительно новой, и не все еще достаточно убеждены в работоспособности системы, потому и

построенные системы в основном являются экспериментальными, но это утверждение является достоверным для систем, чья задача работать в подводных условиях. Что же касается систем, предназначенных работать в воздушной среде – таких систем досочно много. По их принципу следует начать разработку систем для работы под водой.

В целом, можно сказать что система имеет большой потенциал, и судьба этой системы только в руках конструктора и дальнейшего пользователя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Li-Fi (Light Fidelity) – это технология беспроводной передачи данных, основанная на использовании инфракрасного и видимого спектра света в качестве канала связи для высокоскоростной передачи данных. Данная технология является двунаправленной и в отличие от радиоволн может быть использована под водой. Li-Fi относится к коммуникациям через видимый свет (VLC - Visible Light Communication).

В качестве основных LED ламп применяются голубые диоды с фосфорным напылением, галлия-нитридные микросветодиоды, RGB цветные LED лампы. Под цветными лазерами подразумеваются лазерные излучатели, оптоэлектронные компоненты, включающие в себя полупроводниковые лазерные диоды и лазерные модули со встроенными схемами управления.

Li-Fi технология которая в большинстве случаев способна заменить Wi-Fi и другие радиочастотные способы передачи связи. Для некоторых ситуаций использование Li-Fi будет являться более безопасной альтернативой, в иных случаях Li-Fi будет являться единственным высокоскоростным методом связи. Таким образом Li-Fi можно применять в следующих ситуациях и окружении:

- В больнице:
- В аэропортах:
- В самолетах:
- В офисах и школах:
- В научно-исследовательских проектах:

Для использования в научно-исследовательских целях задача системы будет в первую очередь связана с работой в водной среде. . Подобный метод сбора данных с аппаратов поможет в ситуациях, при которых другие способы передачи информации не доступны по тем или иным причинам. Основной областью использования рассматривается океанологические и

океанографические исследовательские комплексы, включающие в себя автономные необитаемые подводные аппараты применения, которых связано с изучением труднодоступных областей.

Таким же образом подобная система связи через световой канал может быть использована:

- На подводных лодках – данные могут передаваться между двумя подводными лодками и препятствие в пути можно обнаружить;
- Для безопасности частных и коммерческих рыболовных судов в дополнение к радио связи – в случае если такое судно обнаруживает какую-то проблему в море и свой корабль, то он может отправить сообщение другому кораблю или центральному органу;
- Спасательные операции в море – если спасательная операция происходит в море, то информация может передаваться с одного корабля на другой;
- Во время патрулирования – если неизвестный корабль находится в море, то патрульный корабль также отправляет информацию в центральный орган [10];
- Для дистанционного беспроводного управления подводными аппаратами;
- Как метод связи между подводными аппаратами и байковыми станциями.

Преимущества системы перед другими способами передачи данных:

- Отсутствие радикального поглощения сигнала водой
- Высокая скорость передачи данных
- Большое количество данных, которые система может передать
- Область применения шире чем у ПЗК
- Уникальные свойства, повышающие уровень физической безопасности сети

- Использование в искробезопасных средах, таких как нефтехимические заводы и нефтяные платформы;
- Таким образом, можно сделать вывод, что в сравнении с Wi-Fi Li-Fi имеет больше преимуществ, нежели недостатков. К основным преимуществам следует отнести высокий уровень конфиденциальности сети, возможность использования ее под водой, и, что немало важно, в морской воде, а также высокую плотность записи и отсутствие сильных потерь.
- К недостаткам же можно отнести возможность полного перекрытия потока данных при возведении преграды, полностью заслоняющей осветительный прибор. Также следует отметить рабочее расстояние – оно в три раза меньше, чем у Wi-Fi, а с учетом применения технологии под водой, расстояние также будет уменьшаться.

Особенности работы системы в водной среде обуславливаются наличием определенных оптико-физических свойств воды. В качестве основных особенностей и возможных препятствий на пути использования Li-Fi систем выделяются показатели ослабления, поглощения, рассеяния и состав водной среды (неорганические соли, растворенные органические соединения, планктон, бактерии, неживая органическая взвесь – детрит, минеральные частицы). Однако, среди всех показателей следует выделить основной. Такой характеристикой может являться показатель ослабления, так как показатели поглощения и рассеяния можно рассчитать математически, основываясь на показателе ослабления.

В качестве показателей эффективности нужно в первую очередь рассматривать расстояние, при котором потери в передаче данных будут минимальны. Также следует учитывать, какой спектр будет использован для передачи данных. Оба этих фактора целиком и полностью зависят от оптических свойств воды.

Коэффициент поглощения - безразмерная физическая величина, характеризующая способность тела поглощать падающее на него излучение.

Самый высокий коэффициент поглощения (0,320) принадлежит красной части спектра электромагнитного излучения (рис.4), а самый низкий коэффициент (0,002) принадлежит синей части спектра. Таким образом, можно сделать вывод, что, используя свет излучения синего спектра, мы получим минимальные потери в оптических свойствах поглощения света водой. Для такого света может быть использована LED лампа с фосфорным покрытием, потому что она излучает синий свет. Очевидно, что использование красного светового спектра не является эффективным, так как при его использовании водой будет поглощено значительное количество света.

Показатель ослабления – величина, обратная расстоянию L , на котором поток монохроматического излучения F , распространяющегося в воде в виде параллельного пучка, ослабляется в результате суммарного действия поглощения и рассеяния в десять раз при десятичном основании или в e раз при натуральном основании.

На показатель ослабления оказывают влияние биологические параметры морской воды (растворенное органическое вещество и взвесь). В результате распада органических веществ образуются гуминовые соединения, имеющие желтый цвет. Такое явление увеличивает поглощение света, что приводит к тому, что показатель ослабления направленного света увеличивается. Растворенную органику могут производить планктон, рыбы и другие подводные организмы. Так же органику может приносить в море через стоки рек и канализационные сооружения.

В случае с инфракрасным излучением следует учитывать несколько другие факторы. Оптические свойства веществ (прозрачность, коэффициент отражения, коэффициент преломления) в инфракрасной области спектра, как правило, значительно отличаются от оптических свойств в видимой и ультрафиолетовой областях. Многие вещества, прозрачные в видимой области, оказываются непрозрачными в некоторых областях инфракрасного излучения и наоборот. Непрозрачной вода для ИК излучения становится из-за высокой степени поглощения света водой. Во-вторых, система на

инфракрасном излучении может перестать работать при помещении самого инфракрасного диода в корпус из недостаточно прозрачного для излучения материала – не все виды оргстекла могут стать удачным решением для корпуса системы.

Рабочим расстоянием принято считать расстояние, пройденное лучом света через толщу воды при котором интенсивность выходного светового потока будет больше или равна половине интенсивности входного потока. Расстояние рассчитывается по формуле закона Бугера-Ламберта-Бера.

Проанализировав данные из таблицы можно сделать вывод, что системы, построенные на ОП со световой отдачей 200 Лм/Вт, 222 Лм/Вт и 333 Лм/Вт могут безошибочно работать на расстояния до 26 метров. В таком случае применение системы будет являться оправданным.

Глубины, на которых могут быть использована Li-Fi технологии определяются не только показателем ослабления, но также и термоклинном – на его уровне наблюдается типичный слой мутности. Вследствие этой особенности, использование системы будет наиболее эффективным. до и после него (на глубинах до и после 10-20 метров)

При анализе данных о показателе ослабления в Черном море, можно сделать вывод, что технология Li-Fi может применяться во всех глубоководных районах. Качество же сигнала и возможности передачи данных будет зависеть в первую очередь от показателя ослабления направленного света.

Как и любая другая система, Li-Fi система должна иметь свои цели и задачи. Целью системы служит передача данных под водой. Под передачей данных может иметься в виду как передача собранной информации аппаратом, так и возможность дистанционного управления аппаратом. Для этих целей приемник и передатчик должны быть направлены в сходное положение и по возможности так, чтобы сигнал не встречал помех. Несмотря на то, что система с LED сигналом в теории может прекрасно работать и с наличием препятствий и помех, система, работающая на инфракрасном излучении помех

не терпит и имеет большее количество несовершенств. Таким образом и формируется задача системы – обеспечение передачи данных или управления без потерь, которые могут произойти в результате появления помех.

Как уже было сказано ранее, система в общем виде представляет собой передатчик и приемник в виде фотодетектора, которые связываются друг с другом через световой канал – передатчик модулирует сигнал, переданный с аппарата или ЭВМ, и передает его на осветительный прибор, который начинает передачу сигнала согласно выбранному способу кодирования в виде мерцания с определенной частотой. Фотодетектор в приемнике «узнает» сигнал, начинает его декодировать и предоставляет в начальном виде оператору ЭВМ к которому была подключена система.

Построена схема системы рассмотрены основные типы оптической модуляции: оптический OFDM с постоянным током (DCO-OFDM), асимметрично обрезанный оптический OFDM (ACO-OFDM) и униполярный OFDM (U-OFDM) для подводных оптических систем беспроводной связи.

На сегодняшний день нет никаких точных рекомендаций относительно конструирования системы – каждый инженер решает сам, как ему строить систему с применением технологии Li-Fi. Отсутствие точных рекомендаций связано с тем, что данная технология является относительно новой, и не все еще достаточно убеждены в работоспособности системы, потому и построенные системы в основном являются экспериментальными, но это утверждение является достоверным для систем, чья задача работать в подводных условиях. Что же касается систем, предназначенных работать в воздушной среде – таких систем досочно много. По их принципу следует начать разработку систем для работы под водой.

В целом, можно сказать что система имеет большой потенциал, и судьба этой системы только в руках конструктора и дальнейшего пользователя.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. H. Haas Wireless data from every light bulb // TED Global (August 2011)
2. H. Haas, L. Yin, Y. Wang, C. Chen What is LiFi? //IEEE J. Light. Technol., 34 (6) (2016), pp. 1533-1544
3. M.S. Islim, et al. Towards 10 Gb/s orthogonal frequency division multiplexing-based visible light communication using a GaN violet micro-LED // Photon. Res., 5 (2) (2017), pp. A35-A43
4. D. Tsonev, S. Videv, H. Haas Towards a 100 Gb/s visible light wireless access network // Opt. Express, 23 (2) (2015), pp. 1627-1637
5. M.S. Islim, M. Safari, S. Videv, H. Haas A proof-of-concept of outdoor visible light communications in the presence of sunlight // LED Professional Symposium - Expo, 2016 (2016)
6. Z. Wang, D. Tsonev, S. Videv, H. Haas On the design of a solar-panel receiver for optical wireless communications with simultaneous energy harvesting // IEEE J. Sel. Areas Commun., 33 (8) (2015), pp. 1612-1623
7. Robust MMSE linear precoding for visible light communication broadcasting systems // 2013 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps) (2013), pp. 1081-1086
8. Электронный ресурс – <https://www.lifitn.com/>
9. Электронный ресурс – <http://www.nextlifi.com/underwater-communications-system/>
- 10.S. Revathy, A. Sangavi, U. Surekha, R. Sushmitha & Dr. N. Nandhagopal, Li-Fi Based Data Transfer in Underwater System // The SIJ Transactions on Computer Science Engineering & its Applications (CSEA), Vol. 5, No. 4, May 2017
- 11.Электронный ресурс – <https://rdltech.in/>
- 12.Электронный ресурс – <https://www.graphene-info.com/>

13. Stefan, H. Burchardt, H. Haas Area spectral efficiency performance comparison between VLC and RF femtocell networks // IEEE International Conference on Communications (ICC) (2013), pp. 3825-3829
14. Y. Liang, H. Haas Physical-layer security in multiuser visible light communication networks // IEEE J. Sel. Areas Commun. (2017)
15. К.В. Показеев Т.О. Чаплина Ю.Д. Чашечкин, Оптика океана // Москва: Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (2010) – С. 48-57
16. Маньковский В.И. Вероятность выживания фотона и ее связь с показателем ослабления направленного света в водах Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 2005. – №6. – С. 68–76.
17. A. Chockalingam, LiFi, Mirrors, and Wireless Communications // Department of ECE Indian Institute of Science, Bangalore NCC'2017 Tutorial IT Madras, Chennai 2 March 2017
18. Гинзбург А.И. Система синоптических вихрей над свалом глубин в северо-западной части Черного моря летом 1993 г. (спутниковая и судовая информация) / А.И. Гинзбург, Е.А. Контарь, А.Г. Костяной, В.Г. Кривошея, Д.М. Соловьев, С.В. Станичный, С.Ю. Лаптев / Океанология. 1998. Т. 38. №1. – С.23-25.
19. Журбас В.М. Циркуляция вод и характеристики разномасштабных течений в верхнем слое Черного моря по дрейфтерным данным / Журбас В.М., А.Г. Зацепин, Ю.В. Григорьева, В.Н. Еремеев, В.В. Кременецкий, С.В. Мотыжев, С.Г. Поярков, П.М. Пулейн, С.В. Станичный, Д.М. Соловьев // Океанология, 2004. Т. 44. №1. – С.33-39.
20. Зац В.И. Влияние физико-океанологических факторов на поле примеси в шельфовой зоне моря. // Автореф. дис. д-ра геог. наук. Изд-во МГУ, 1975. – С.19-28.
21. Pope R.M., Fry E.S. Absorption spectrum 380–700 nm of pure water. II. Integrating cavity measurements // Appl. Opt. 1997. Vol. 36. № 33. P. 8710–8723.

22. А. С. Микаэлян, В. А. Силкин, Л. А. Паутова, Развитие кокколитофорид в Черном море: межгодовые и многолетние изменения // *Океанология*, 2011, том 51, № 1, с. 45–53
23. Берсенева Г.П., Чурилова Т.Я., Георгиева Л.В. Сезонная изменчивость хлорофилла и биомассы фитопланктона в западной части Черного моря // *Океанология*. – 2004. – Том 44, № 3. – С. 389-398.
24. Kahn, J.M. and Barry, J.R. (1997) Wireless Infrared Communications. *Proceedings of the IEEE*, 85, 265-298.
25. Tang, Q., Gupta, S.K.S. and Schwiebert, L. (2005) BER Performance Analysis of an On-Off Keying Based Minimum Energy Coding for Energy Constrained Wireless Sensor Applications. *IEEE International Conference on Communications*, 4, 2734-2738.
26. Jie Lian, Yan Gao, Peng Wu, and Dianbin Lian, Orthogonal Frequency Division Multiplexing Techniques Comparison for Underwater Optical Wireless Communication Systems // *Sensors (Basel)*. 2019 Jan; 19(1) стр 160.
27. Cicalo S., Tralli V. Adaptive Resource Allocation With Proportional Rate Constraints for Uplink SC-FDMA Systems. *IEEE Commun. Lett.* 2014;18:1419–1422. doi: 10.1109/LCOMM.2014.2332997.
28. Tsiropoulou E.E., Kapoukakis A., Papavassiliou S. Energy-efficient subcarrier allocation in SC-FDMA wireless networks based on multilateral model of bargaining; *Proceedings of the 2013 IFIP Networking Conference*; Brooklyn, NY, USA. 22–24 May 2013; pp. 1–9.
29. Ahani G., Yuan D., Ding W. On SC-FDMA resource allocation with power control; *Proceedings of the 2016 IEEE 21st International Workshop on Computer Aided Modelling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*; Toronto, ON, Canada. 23–25 October 2016; pp. 112–116.
30. Eleni Tsiropoulou E., Aggelos Kapoukakis S.P. Uplink resource allocation in SC-FDMA wireless networks: A survey and taxonomy, *Computer*

Networks. Comput. Netw. 2016;96:1–28. doi: 10.1016/j.comnet.2015.12.006.

31. Azhar A., Tran T., O'Brien D. A Gigabit/s Indoor Wireless Transmission Using MIMO-OFDM Visible-Light Communications. *IEEE Photonics Technol. Lett.* 2013;25:171–174. doi: 10.1109/LPT.2012.2231857.
32. Wu L., Zhang Z., Dang J., Liu H. Adaptive Modulation Schemes for Visible Light Communications. *J. Lightwave Technol.* 2015;33:117–125. doi: 10.1109/JLT.2014.2374171.
33. Elgala H., Mesleh R., Haas H. Indoor optical wireless communication: Potential and state-of-the-art. *IEEE Commun. Mag.* 2011;49:56–62. doi: 10.1109/MCOM.2011.6011734.
34. Dissanayake S.D., Armstrong J. Comparison of ACO-OFDM, DCO-OFDM and ADO-OFDM in IM/DD Systems. *J. Lightwave Technol.* 2013;31:1063–1072. doi: 10.1109/JLT.2013.2241731.
35. Armstrong J., Schmidt B.J.C. Comparison of Asymmetrically Clipped Optical OFDM and DC-Biased Optical OFDM in AWGN. *IEEE Commun. Lett.* 2008;12:343–345. doi: 10.1109/LCOMM.2008.080193.
36. Tsonev D., Sinanovic S., Haas H. Novel Unipolar Orthogonal Frequency Division Multiplexing (U-OFDM) for Optical Wireless; Proceedings of the 2012 IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC Spring); Yokohama, Japan. 6–9 May 2012; pp. 1–5.
37. Armstrong J., Lowery A.J. Power efficient optical OFDM. *Electr. Lett.* 2006;42:370–372. doi: 10.1049/el:20063636.
38. Bai J., Li Y., Cheng W., Yang Y., Duan Z., Wang Y. PAPR reduction for IM/DD-OFDM signals in underwater wireless optical communication system; Proceedings of the 2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA); Wuhan, China. 31 May–2 June 2018; pp. 1837–1840. [Google Scholar]

39. Lu H., Li C., Lin H., Tsai W., Chu C., Chen B., Wu C. An 8 m/9.6 Gbps Underwater Wireless Optical Communication System. *IEEE Photonics J.* 2016;8:7906107. doi: 10.1109/JPHOT.2016.2601778.
40. Hessien S., Tokgoz S.C., Anous N., Boyacu A., Abdallah M., Qaraqe K.A. Experimental Evaluation of OFDM-Based Underwater Visible Light Communication System. *IEEE Photonics J.* 2018;10:7907713. doi: 10.1109/JPHOT.2018.2871958.
41. Электронный ресурс – <https://purelifi.com>