ЭЛ №ФС77-57961
ISSN:2313-8459

«КОНТЕНАНТ»

ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том 24, №4, 2025

Журнал включен в Российский Индекс Научного Цитирования.
Входит в перечень ВАК с 20.03.2023.
Зарегистрирован в Научной Электронной Библиотеке.
Лицензионный договор №727-11/2014.

Учредитель и издатель – Общественная научно-техническая академия «Контенант»
Издается с 2019 года.

С О Д Е Р Ж А Н И Е

Волков В.Г., Гиндин П.Д., Карпов В.В., Кузнецов С.А., Сеник Б.Н.
Подводные звуковизоры 1

Городничев В.А., Белов М.Л., Белов А.М., Назаров В.В.
Исследование эффективности классификации участков лесных массивов по спектрам отражения для различных спектральных диапазонов в видимой и ближней ИК области 42

Иванов С.Е., Федотов Ю.В., Белов М.Л., Белов А.М., Шкарупило А.А.
Анализ возможностей методов машинного обучения для задачи классификации лесных пород Европейской части России по спектрам отражения в видимой и ближней ИК области 54

Нгуен Минь Бач, Ю.В. Федотов, Н.В. Барышников, М.Л. Белов
Исследования спектров отражения нефтяных загрязнений в ближнем ИК диапазоне в условиях заморозков на почве 66

Плитарак М.С.
Генерация солитонных молекул управляемого порядка с низким уровнем шума в условиях компенсации дисперсии второго и третьего порядка в полностью волоконном эрбиевом лазере 76

С.Р. Кисленко
Гибкие механизмы в точном приборостроении 87

Выходит 4 раза в год
Журнал печатается при поддержке руководителей организаций и предприятий оптической промышленности и учебных заведений.

Редакционный совет:
Абдулкадыров Магомед Абдуразакович
Архипов Сергей Алексеевич
Бажанов Юрий Владимирович
Бездидько Сергей Николаевич
Белов Михаил Леонидович
Коротаев Валерий Викторович
Лукин Анатолий Васильевич
Сеник Богдан Николаевич
Соколов Андрей Леонидович
Торшина Ирина Павловна

Редакционная коллегия:
Барышников Николай Васильевич – главный редактор
Иванов Сергей Евгеньевич
Ильянок Юлия Михайловна
Семенов Александр Павлович

Мнения, высказанные в материалах журнала, не обязательно совпадают с точкой зрения редакции.
Ответственность за содержание статей несут авторы.
При полной или частичной перепечатке ссылка на журнал «Контенант» обязательна.

Рукописи и фотографии не возвращаются.

Подписано в печать 11.06.2026
Статьи, подготовленные к изданию, передаются редакции электронного научно-технического журнала в издательство по электронной почте nukrlm@bmstu.ru для последующего размещения на сайте Диссертационного рецензируемого научно-технического журнала «Контенант» с последующей передачей по договору №727-11/2014 в Российский Индекс Научного Цитирования Научной Электронной Библиотеки.

Редакционная коллегия Диссертационного рецензируемого журнала «Контенант»

УДК 622.232.8:621.384.3.01:531.714.2

ПОДВОДНЫЕ ЗВУКОВИЗОРЫ

Волков В.Г.[1*], Гиндин П.Д.[1], Карпов В.В.[1], Кузнецов С.А.[1], Сеник Б.Н.[2,3**]

[1] – Акционерное общество «Московский завод «Сапфир» (АО «МЗ «Сапфир»), г. Москва

[2] – Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, (МГТУ им. Н.Э. Баумана), г. Москва

[3] – Московский институт радиотехники, электроники и автоматики – Российский технологический университет (РТУ – МИРЭА), г. Москва

E-mail: * – volkvik2009@yandex.ru, ** – bogdan_senik@mail.ru

Аннотация: Рассматриваются подводные телевизионные камеры для фото- и видеосъемки. Приведены основные параметры подводных фото- и видеокамер, внешний вид, оценены их возможности, показан характер изображения.

Ключевые слова: подводная телевизионная камера, разрешение, глубина погружения, угол обзора, стабилизация, объем памяти, масса, габариты.

UNDERWATER SOUND VISUALIZERS

Volkov V.G.[1*], Gindin P.D.[1], Karpov V.V.[1], Kuznetsov S.A.[1], Sennik B.N.[2,3**]

[1] – Joint Stock Company "Moscow plant "Saphir" (JSC "MZ "Saphir"), Moscow

[2] – Bauman Moscow State Technical University, (Bauman Moscow State Technical University), Moscow

[2] – Moscow Institute of Radio Engineering, Electronics and Automation – Russian Technological University (RTU – MIREA), Moscow

E-mail: * – volkvik2009@yandex.ru, ** – bogdan_senik@mail.ru

Abstract: This article examines underwater television cameras for photo and video recording. The article presents the main parameters of underwater photo and video cameras, their appearance, their capabilities, and the nature of the image.

Keywords: underwater television camera, resolution, immersion depth, viewing angle, stabilization, memory capacity, weight, dimensions.

Звуковизор (ЗВ) [1] – устройство для получения изображения предметов при помощи ультразвуковых (УЗ) волн с использованием акустоэлектронного преобразователя. Последний позволяет представить акустическое «изображение», т.е. пространственное распределение звукового давления, в виде оптического изображения на экране дисплея. ЗВ обеспечивает поиск, обнаружение и распознавание подводных объектов наблюдения. Однако если ЗВ решает задачу только поиска и обнаружения, то он называется «гидролокатор» [2].

Его функциональная схема представлена на рисунке 1.

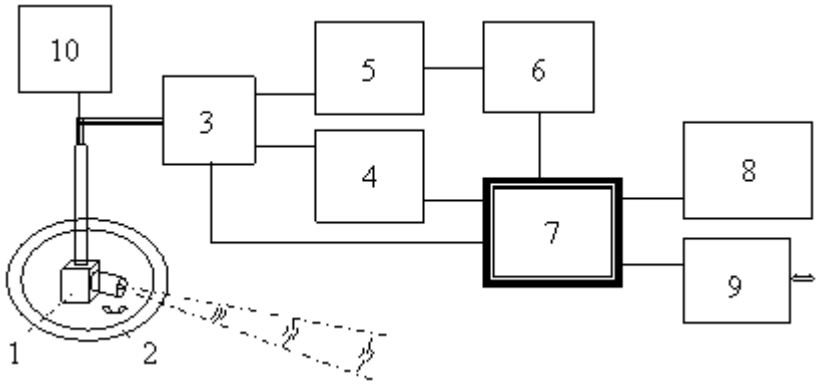


Рисунок 1 – Блок-схема гидролокатора

Акустическая антенна 1, геометрически защищенная оболочкой 2, сделанной из прозрачного для звука материала, находится в воде. Через кабель она соединена с коммутатором 3, который поочередно подключает к ней генератор 4 или приемник-усилитель акустических сигналов 5. Последний соединен с селектором сигналов 6, выход которого подключен к микропроцессору 7. Выходы последнего подключены к индикатору (дисплею) 8 и к интерфейсному блоку 9. Работой гидролокатора автоматически управляет микропроцессор 7. Он подает на генератор 4 сигнал о начале зондирования водного пространства и команды о параметрах этого зондирования (частота ультразвука, продолжительность, структура и мощность УЗ импульсов, периодичность их повторения и т.п.). Затем микропроцессор 7 подает сигнал на коммутатор 3, который пропускает электрические колебания от генератора 4 к антенне 1. Там они с помощью пьезоэлектрического осциллятора превращается в мощные акустические колебания и излучаются антенной в окружающее водное пространство.

В одних вариантах работы УЗ волна излучается равномерно во всех направлениях нижележащего водного полупространства. В других вариантах УЗ волна излучается в

виде направленного конусообразного пучка волн. Распространяясь в воде, волны натыкаются на имеющиеся в них объекты, отражаются и рассеиваются ими. Часть отраженных и рассеянных УЗ волн в значительно ослабленном виде возвращается назад к акустической антенне 1. Независимо от углового распределения излучения угловая диаграмма направленности этой антенны на прием всегда достаточно узкая, что обеспечивает прием акустических сигналов лишь с того направления, куда «смотрит» антенна. Сразу же после посылки мощного акустического зондирующего сигнала микропроцессор 7 переключает коммутатор 3 на прием. При этом акустические сигналы, которые возвратились к антенне 1 от имеющихся в воде объектов, поступают на приемник 5, усиливаются и передаются в селектор 6. Селектор выделяет из них лишь информационно полезные составляющие, которые и передает на микропроцессор 7. Последний обрабатывает собранную информацию и формирует на индикаторе для пользователя картину, которая воссоздает окружающую обстановку в водной среде. Через интерфейсный блок 9 микропроцессор 7 может передавать некоторую важную информацию другим приборам и получать дополнительную информацию от них, также отображая ее на индикаторе (например, данные о температуре воды, атмосферном давлении, о направлении и силе ветра и т.п.).

Во многих гидролокаторах, особенно предназначенных для пассажирских и военных кораблей, акустическая антенна 1 является подвижной. Чтобы «видеть» большой сектор окружающего водного пространства, она может вращаться вокруг горизонтальной и/или вертикальной оси. Вращение по азимуту обычно возможно на все 360°. Тогда для работы привода антенны в составе гидролокатора имеется еще и сервоусилитель 10, управляемый тоже от микропроцессора 7.

Однако для не просто обнаружения, но и для создания изображения объектов используются звуковизоры (ЗВ). Они особенно эффективны для детального осмотра грунта и объектов в условиях сильного замутнения воды [3]. Блок-схема ЗВ дана на рисунке 2.

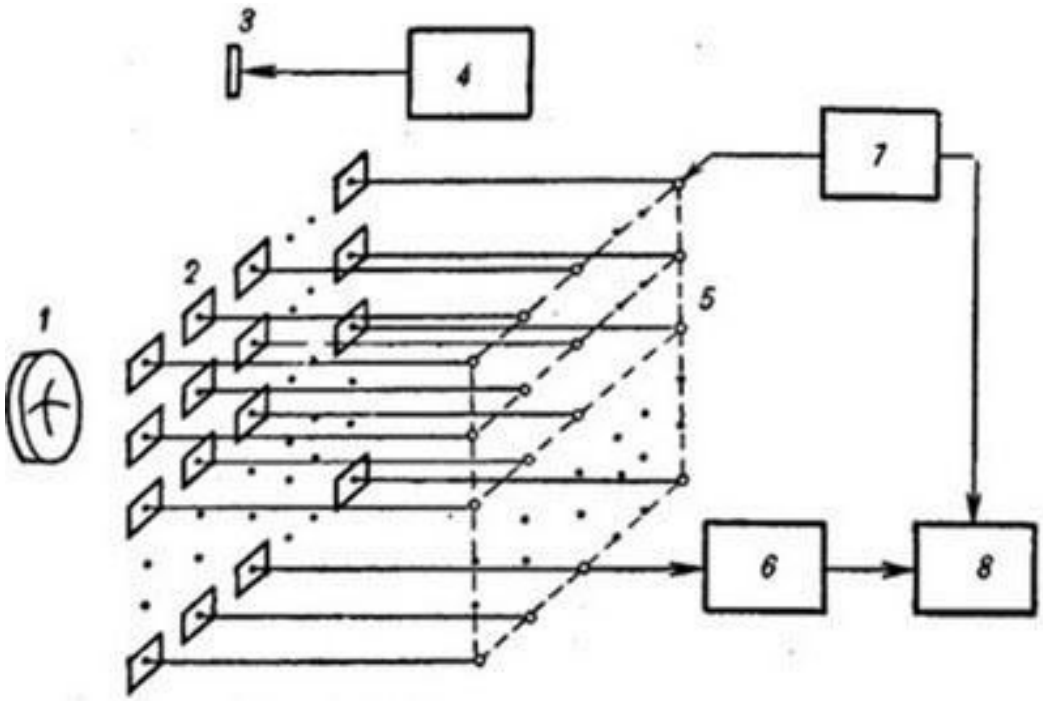


Рисунок 2 – Блок-схема ЗВ: 1 – акустическая линза; 2 – матрица приемников; 3 – излучатель; 4 – генератор; 5 – матрица переключающих элементов; 6 – приемная аппаратура; 7 – синхронизатор; 8 – индикатор

ЗВ применяются в океанологии для получения изображений морского дна и природных структур, поиска затонувших предметов, обеспечения подводной навигации, осмотра подводных сооружений и др.

В ЗВ изображение объекта, представляющее собой пространственные амплитудные изменения ультразвукового поля в плоскости приемника, может быть воспринято и передано, как в обычной телевизионной системе. ЗВ состоит из излучателя, фокусирующего устройства, акустического приемника и индикатора. Отраженное от объекта акустическое колебание фокусируется на матрицу приемников, создавая на каждом из них сигнал, соответствующий изображению одного элемента разрешения. Производя поочередное снятие сигнала с каждого элемента матрицы приемников и подавая их после усиления на индикатор телевизионного типа, можно воссоздать визуальное изображение объекта. При использовании системы с движущегося носителя «опрос» приемников можно производить только в одной плоскости – перпендикулярной движению носителя. Развертка изображения в другой плоскости обеспечивается движением носителя. Рабочие частоты в ЗВ выбираются в диапазоне нескольких мегагерц [3].

В изображениях объектов, полученных методом звуковиденя, наблюдается некоторое случайное распределение бликов, характер которых зависит от ориентации и формы объекта, частоты акустического колебания, интерференции отраженных волн. У рассмотренного метода пока существуют некоторые ограничения, препятствующие его широкому внедрению в практику поисковых работ. Это прежде всего низкое качество акустических фокусирующих устройств и отсутствие мощных направленных излучателей ультразвуковых колебаний на частоте 5-10 МГц, отсутствие необходимых приемников и сложность сканирования их матрицы [3].

В последнее время много внимания уделяется акустической голографии, позволяющей получить объемное визуальное изображение объекта [3]. Акустическое изображение объекта в плоскости приемника голографической системы представляет собой пространственное распределение фаз отраженного колебания. Такое распределение возникает при одновременном облучении матрицы приемников опорным акустическим колебанием и эхо-сигналом. Фазовые соотношения эхо-сигнала содержат информацию об объекте поиска. На матрице приемников образуется интерференционная картина сложения двух акустических колебаний (опорного и сигнала), соответствующая содержащейся в эхо-сигнале информации. Эта интерференционная картина, называемая голограммой, может быть перенесена обычными радиотехническими средствами с матрицы приемников на индикатор. Из голограммы может быть восстановлено изображение объекта при облучении ее когерентными световыми колебаниями. Разрешающая способность голографических систем сравнима с разрешающей способностью оптических или несколько хуже их. Однако при сильных турбулентностях воды и значительной ее мутности акустические голографические (фазовые) системы имеют явное преимущество перед телевизионными (амплитудными) системами. Типовая система обнаружения с использованием принципа акустической голографии показана на рисунке 3 [3]. Характер работы со ЗВ с борта судна представлен на рисунках 4, 5.

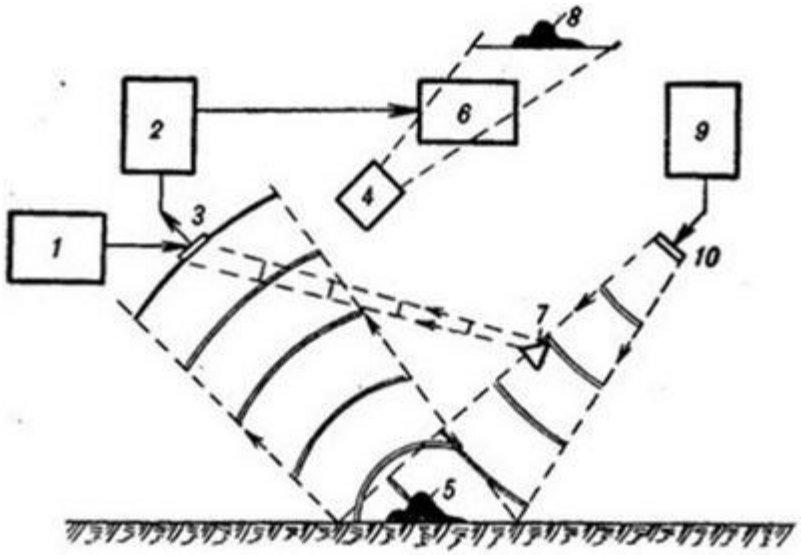


Рисунок 3 – Блок-схема системы обнаружения, работающей по принципу голографии: 1 – устройство сканирования матрицы приемников; 2 – приемная аппаратура: 3 – матрица приемников; 4 – источник восстанавливающего света; 5 – объект: 6 – устройство для-восстановления изображения; 7 – отражатель опорного акустического колебания; 8 – изображение объекта; 9 – генератор; 10 – излучатель

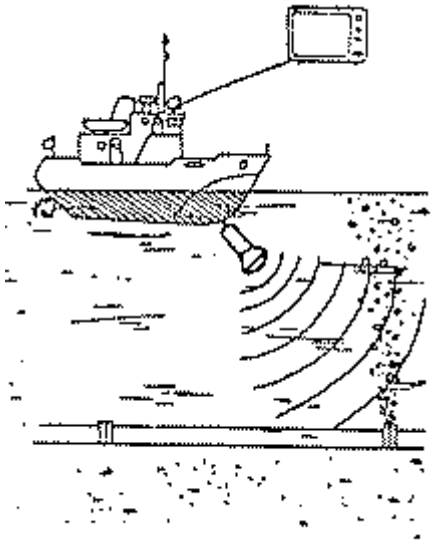


Рисунок 4 – Схема наблюдения с борта судна водолаза на дне моря в подводный ЗВ

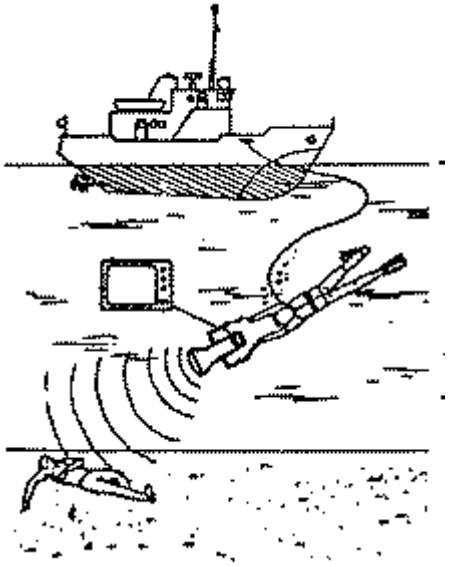


Рисунок 5 – Схема спасения утопающего с помощью подводного ЗВ при работе с борта судна

Возможны многие способы излучения звука в воде и приема отраженных звуковых колебаний, но наиболее широкое распространение получил способ преобразования

электрической энергии в звуковые колебания и обратно. Прибор, осуществляющий преобразование электрической энергии в звуковую, называется излучателем, прибор, позволяющий решить обратную задачу, — приемником или гидрофоном. Прибор, осуществляющий обе эти операции, называется преобразователем. Качество этих приборов оценивается по следующим основным характеристикам: чувствительность, эффективность излучения, коэффициент полезного действия, характеристика направленности, осевой коэффициент концентрации, частотная характеристика.

В настоящее время существует достаточно большое разнообразие ЗВ, отличающихся способом формирования характеристики направленности (ХН) антенны и размерностью сканируемого пространства. Классификация ЗВ приведена на рисунке 6. [4].

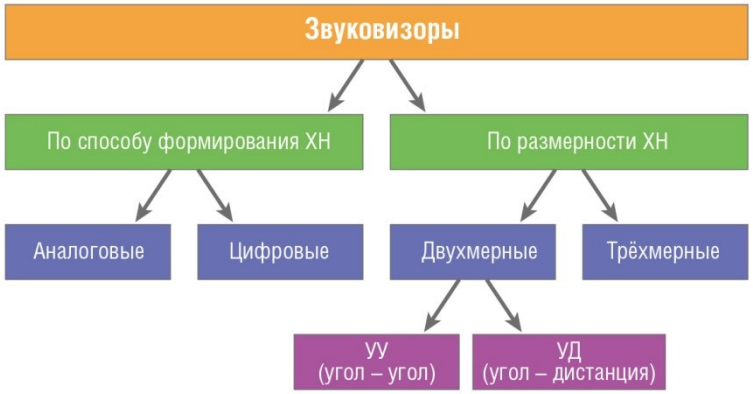


Рисунок 6 – Классификация ЗВ

По способу формирования изображения различают аналоговые и цифровые ЗВ, а по размерности сканируемого пространства – двумерные (2D) и трёхмерные (3D). В аналоговых ЗВ формирование ХН осуществляется с помощью акустической линзы, в цифровых – путём взвешенного суммирования сигналов с отдельных элементов приёмной антенны. В 3D – ЗВ обзор пространства осуществляется по всем трём координатам. В 2D – ЗВ пространственное разрешение обеспечивается либо только по двум угловым координатам (УУ-ЗВ), либо по одному углу и дистанции (УД-ЗВ) [4].

В течение длительного времени развитие ЗВ шло по линии совершенствования аналоговых двумерных устройств, использующих для формирования лучей акустическую линзу [4]. В таких ЗВ ультразвуковой прожектор облучает («подсвечивает») наблюдаемый подводный объект. Отражённые ультразвуковые волны с помощью акустической линзы фокусируются на матрицу пьезоэлементов, сопряжённую с передней поверхностью

специальной электронно-лучевой трубки. Электронный луч считывает с матрицы электрический потенциал, который, в свою очередь, детектируется, оцифровывается и отображается на мониторе персонального компьютера в виде пространственного распределения яркости (цвета). В этом классе наиболее совершенным, возможно, является ЗВ, созданный совместно Акустическим институтом и научно-производственным объединением «АКМА». Он обладает следующими параметрами: рабочая частота 1 МГц; ширина сектора обзора 30°×30°; угловое разрешение 0,9°×0,9°; предельная дальность действия 30 м; масса в воздухе 15 кг; размеры 42×42×55 см [4].

К недостаткам такого ЗВ следует отнести значительные габариты, обусловленные акустической линзой и электронно-лучевой трубкой. Кроме того, этот ЗВ имеет ограниченное угловое разрешение (порядка 30 точек в каждом направлении) и вовсе не имеет разрешения по дистанции. Следовательно, он не позволяет определять дистанцию до объекта и реконструировать его форму [4].

Существенное улучшение качества освещения подводной обстановки может быть достигнуто при использовании современных цифровых технологий для формирования пространственной избирательности. Преимущества использования цифровой технологии связаны прежде всего с её методологической гибкостью, которая при высоком быстродействии современных сигнальных процессоров позволяет повысить угловое разрешение, помехоустойчивость и дальность действия за счёт увеличения числа элементов приёмной антенны и использования длинных широкополосных сигналов. При формировании трёхмерной избирательности появляется возможность воспроизводить не только акустическую освещённость поверхности объекта, но и его форму. Однако современный уровень развития сигнальных процессоров ещё не позволяет формировать достаточное число узконаправленных лучей при использовании полностью заполненной двумерной антенны. Так, приёмная антенна 3D - ЗВ EchoScope 1600 норвежской фирмы OmniTech состоит из 40×40 элементов. Соответственно, реальное разрешение по каждому углу не превышает 40 лучей. Правда, цифровые методы формирования лучей позволяют при изменении рабочей частоты распределять эти 40 лучей в разные по ширине сектора обзора. Предусмотрены 3 рабочие частоты: 150, 300 и 600 кГц. Этим частотам соответствуют сектора углов обзора 90°×90°, 50°×50° и 25°×25° и значения разрешающей способности по углу 2,5°, 1,3° и 0,6°. Предельная дальность действия этой камеры равна 100 м. Скорость обновления изображения составляет 5-10 кадров в секунду. Основным

недостатком данного ЗВ следует признать невысокое качество изображения из-за ограниченной разрешающей способности по углам. Можно предположить, что повышение разрешающей способности за счёт увеличения числа элементов сдерживается резким усложнением задач оцифровки сигналов с приёмных элементов антенны и формирования двумерной ХН. Весьма значительны габариты (60×40×20 см) и масса (55 кг) приёмно-излучающего модуля, а также стоимость этого изделия [4].

Оценка дальности действия ЗВ

Для оценки зависимости дальности действия от частоты вычислим величину отношения сигнал/помеха в отдельном пространственном канале ЗВ, в котором наблюдается фрагмент звукорассеивающей поверхности подводного объекта. Под сигналом будем понимать мощность акустического излучения, рассеянного элементарной разрешаемой площадкой на поверхности наблюдаемого объекта. В качестве помехи рассматриваются главным образом шумы усилителей сигналов с элементов приёмной антенны. Несложные выкладки показывают, что в этом случае зависимость дальности действия от частоты зондирующего сигнала для 3D-ЗВ определяется соотношением [4]:

$$10^{-0,2\,\beta\,(f)\,R}\,R^{-2}\,f^{-2} = \alpha\,N^2\,(\rho\,c^3\,N_T\,w\,m_S\,\gamma^2_R\,T)^{-1},$$

где f – частота зондирующего сигнала; R – расстояние до звукорассеивающей поверхности; $\beta(f)$ – частотная зависимость коэффициента поглощения звука в воде; α – пороговое значение отношения сигнал/помеха, характеризующее качество акустического изображения; N – спектральная плотность мощности суммарной помехи, приведённой к выходу элементов приёмной антенны; ρ – плотность воды c – скорость звука в воде; N_T – число элементов излучающей антенны; w – плотность мощности излучения на активной поверхности излучателей; m_S – коэффициент обратного рассеивания звука от поверхности; γ_R – чувствительность отдельного элемента приёмной антенны; T – длительность зондирующего сигнала.

Частотная зависимость левой части приведённого выражения имеет вид монотонно убывающей функции как частоты f, так и расстояния R. Следовательно, чем меньше значение выражения справа, которое для удобства определим как коэффициент A, тем больше может быть рабочая частота или дальность действия. При заданных характеристиках среды распространения звука и облучаемого объекта (параметры ρ, c, w, m_S) уменьшение величины коэффициента A может достигаться за счёт уменьшения

уровня помехи, повышения чувствительности пьезоэлектрических преобразователей, увеличения числа элементов излучающей антенны и увеличения длительности зондирующего сигнала. Каждая из перечисленных величин имеет свой предел. Спектральная плотность шумов малошумных усилителей составляет 10^{-8} - 10^{-9} В (Гц.)$^{-0,5}$. Максимальная чувствительность пьезоэлектрических преобразователей к давлению достигает сотен мкВ/Па, докавитационная плотность излучения – порядка 1 Вт/см^2. Число элементов излучающей антенны сопоставимо с числом разрешаемых углов. Длительность зондирующего сигнала ограничена временем его распространения от излучателя до объекта и обратно [4].

Значение дальности действия гидроакустических приборов, в том числе и ЗВ, определяется величинами, зависящими от частоты. Так, например, от частоты зависят: уровень помех, полоса пропускания частот приемного тракта, обусловленная эффектом Доплера, коэффициент концентрации, влияющий как на уровень помех, так и на уровень сигнала, коэффициент затухания звука и т.д. Повышение, с одной стороны, способствует увеличению дальности действия благодаря, например, снижению уровня помех; с другой стороны, приводит к увеличению затухания звука и тем самым влияет в сторону уменьшения дальности действия. Следовательно, существует частота оптимальная, при которой может быть достигнута заданная дальность действия гидроакустического прибора наименьшей ценой, т.е. наименьшей излучающей мощностью с случае связи и эхолокации или наименьшей излучаемой мощностью в случае связи и эхолокации или наименьшей мощностью источника шумового сигнала в случае шумопеленгования [4].

Определение оптимальной частоты для различных типовых случаев основано на анализе частотно-зависимых параметров уравнения гидролокации, поскольку дальность действия ЗВ определяется уравнением [5]:

$$J_э = \delta^2 J_п \text{ или } p_э = \delta\ p_п,$$

где $J_э$ – интенсивность эхосигнала, $J_п$ – интенсивность помех; или – $p_э$ давление эхосигнала, $p_п$ – давление помех, δ – коэффициент распознавания.

Для сферического объекта (или для сферического эквивалента) [5]:

$$J_э = P_a\ \gamma,$$

где P_a – мощность, излучаемая антенной, γ – коэффициент концентрации.

Коэффициент распознавания, как будет показано выше, определяется как [5]:

$$\delta = (2^{0,5})\ K_\delta\ (\Delta f\ T_c)^{-1},$$

где Δf - полоса пропускания шумового тракта, T_c - длительность сигнала, $К_\delta$ – пороговое отношение сигнал/помеха на индикаторе.

В свою очередь, полосу пропускания приемного тракта, обусловленную эффектом Доплера, можно представить в виде [5]:

$$\Delta f = 4\ f\ V_{max}\ c^{-1},$$

где f = частота работы ЗВ, V_{max} – максимальная скорость цели, с – скорость звука в морской воде.

Таким образом, зависящими от частоты величинами являются (если считать, что сила цели от частоты не зависит, в случае необходимости учесть эту зависимость нетрудно). Если при проектировании гидролокатора задается постоянная площадь (размеры) приемной и передающей систем то, например, для плоской прямоугольной антенны коэффициент концентрации описывается формулой:

$$\gamma = 4\ \pi\ S\ \lambda^2 = 4\ \pi\ S\ f^2\ c^{-2},$$

где S – площадь приемно-излучающей антенны системы, $м^2$, λ = рабочая длина волны звуковизора, мкм.

Если площадь излучающей и приемной антенны остается постоянной, то это означает, что с изменением частоты не удерживается постоянной, то это означает, что с изменением частоты не удерживается постоянной величина, определяющая раствор характеристики направленности (где – размер приемно-излучающей системы).

Основные параметры современных ЗВ и результаты расчета их дальности действия представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные параметры современных подводных звуковизоров

№ п/п	Фирма	Модель	D, м/ H, м	Угол обзора, град.	U, В	$P_э$, Вт	Масса на воздухе/в воде, кг	Габариты, мм	Рабочая частота, кадров Гц/Частота строк	Коли-чество лучей	Примечания
1	АО “Тетис Про”	Blue View	150/-	45	~/=	30	5,75/1,4	95x70x40	25/450 КГц	256	ДКС = 10 м, Р = 0,95
23	АО “Тетис Про”	Blue View 5000-1350 (3D)	30/ 300	45x1	=, 20-29	45	9,84/3,72	266,1x 233,7x 396	40/1,35 МГц	256	Угол обзора 45 - 360°, УРЛ = 0,18°, РПД = 15 мм
4	АО “Тетис Про”	Blue View 5000-2250 (3D)	10/ 300	45x1/8 0x1	=, 20-29	45	8,66/2,72	226,1x 218,4x 391,2	40/2,25 МГц	256	ШЛ = 1x1°, ВПЕ = RS485, Угол обзора 45 - 360°
5	АО “Тетис Про”	Blue View M900-45	100/ 1000	45	=, 12-48	13	2,3/0,5		20/900 КГц	256	ШЛ = 1°x20', УРЛ = 0,18°, РПД = 25,4 мм, Скорость обновления до 30 Гц, ВПЕ = VDSL
6	АО “Тетис Про”	Blue View M900-90	100/ 1000	90	=, 12-48	13	2,3/0,5		20/900 КГц	256	ШЛ = 1°x20', УРЛ = 0,18°, РПД = 25,4 мм, Скорость обновления до 30 Гц, ВПЕ = VDSL

№ п/п	Фирма	Модель	D, м/ H, м	Угол обзора, град.	U, В	$P_э$, Вт	Масса на воздухе/в воде, кг	Габариты, мм	Рабочая частота, кадров Гц/Частота строк	Коли-чество лучей	Примечания
7	АО “Тетис Про”	Blue View M900-130	100/ 1000	130	=, 12-48	13	5/1,1		20/900 КГц	256	ШЛ = 1°x20', УРЛ = 0,18°, РПД = 25,4 мм, Скорость обновления до 30 Гц, ВПЕ = VDSL
8	АО “Тетис Про”	Blue View P900-45	100/ 1000	45	=, 12-48	13	5/1,1	Ø240x175	-/900 КГц	256	ШЛ = 1°x20', УРЛ = 0,18°, РПД = 25,4 мм, Скорость обновления до 30 Гц, ВПЕ = VDSL
10	АО “Тетис Про”	Blue View-P900-2250-45-900 кГц	100/-	45x20	=, 12-48				15/900 КГц	256	РПД = 10 мм, ВПЕ = VDSL
11	АО “Тетис Про”	Blue View-P900-2250-45-2,25 МГц	100/-	45x30	=, 12-48				15/2,25 МГц	256	РПД = 10 мм
12	АО “Тетис Про”	Blue View P450-45	300/ 1000	45	=, 12-48	8,5-9,5	2,6/0,6	Ø240x175	-/450 КГц	256	ШЛ = 1 - 15°/, УРЛ = 0,18°, РПД = 50,8 мм,

№ п/п	Фирма	Модель	D, м/ H, м	Угол обзора, град.	U, В	$P_э$, Вт	Масса на воздухе/в воде, кг	Габариты, мм	Рабочая частота, кадров Гц/Частота строк	Коли-чество лучей	Примечания
13	АО “Тетис Про”	Blue View P450-90	300/ 1000	90	=, 12-48	20-24	3,9/1,3	Ø320x180	-/450 КГц	512	ШЛ = 1 - 15°/, УРЛ = 0,18°, РПД = 50,8 мм,
14	АО “Тетис Про”	Blue View P450-90-D	300/ 4000	90	=, 12-48	17-23	7,6/3,6	Ø400x200	-/450 КГц	512	ШЛ = 1 - 15°/, УРЛ = 0,18°, РПД = 50,8 мм,
15	АО “Тетис Про”	Blue View P450-130	300/ 1000	130	=, 12-48	20-24	3,9/1,3	Ø320x186	-/450 КГц	768	ШЛ = 1 - 15°/, УРЛ = 0,18°, РПД = 50,8 мм,
16	АО “Тетис Про”	Blue View P450-130-D	300/ 4000	130	=, 12-48	17-23	7,6/3,6	Ø400x200	-/450 КГц	768	ШЛ = 1 - 15°/, УРЛ = 0,18°, РПД = 50,8 мм,
17	АО “Тетис Про”	Тритон-900-2D	30/ 100	50x20	~, 220 =, 18-36	20	2/0,5	Ø110x180	10-30/450 КГц 0,03-1Гц,/2,25 МГц	64	Акустическое изображение: 2D – при поиске, 3D – при распознавании, РПУ = 1°. РПД = 25 мм, ДКС = 10 м; 150 м, Δt = (+5)-(+50)°С, НБ имеет массу 5кг, габариты 462x340x170 мм, U =~ 220 В, $P_э$ = 60 Вт, диаметр экрана дисплея 15,6 дюйма

№ п/п	Фирма	Модель	D, м/ H, м	Угол обзора, град.	U, В	$P_э$, Вт	Масса на воздухе/в воде, кг	Габариты, мм	Рабочая частота, кадров Гц/Частота строк	Коли-чество лучей	Примечания
18	АО “Тетис Про”	Тритон-900-3D	30/ 200	45х20	~, 220 =, 18-36	20	2/0,5	Ø110х180	30 Гц,/900 КГц		ШЛ = 1х20°, °. РПД = 25 мм, ДКС = 10 м; 150 м НБ имеет массу 5кг, габариты 462х340х170 мм, U = ~ 220 В, $P_э$ = 60 Вт, диаметр экрана дисплея 15,6 дюйма
19	АО “Тетис Про”	Наутилус-50	35/50	60х0,3	~, 90-264 =, 9-28		2/0,5	378х110х 97	-/1МГц		Звуковизор бокового обзора
20	АО “Тетис Про”	Марлин-350	-/350		~, 220	2500	50/-	840х500х 370 (аппарат) 680х800х 720 (вьюшка)			ДКС = 450 м, ВПЕ = VDSL, Δt = (+40)-(+50)°С,
21	АО “Тетис Про”	DIDSON	90/-	29	~, 220	30	4/-	340х330х 110	-/1,1 МГц	256	ДКС = 15 м, ВПЕ = VDSL, Р = 0,95

№ п/п	Фирма	Модель	D, м/ H, м	Угол обзора, град.	U, В	$P_э$, Вт	Масса на воздухе/в воде, кг	Габариты, мм	Рабочая частота, кадров Гц/Частота строк	Коли-чество лучей	Примечания
22	Sono Vi Net	Нептун	100/ 300	45x15	=, 9-36		4,51/-	245x234x 95	-/450 кГц		ДКС = 450 м, ВПЕ = VDSL
23	НИИ «Платан»	Nppgamma	3-50/-	30-40	=, 24	150	10-25/-		-/2,5 МГц		Время обновления кадра 0,04 с
24	НИИ «Риф»	Нептун	40/ 300	45			5,75/-	95x70x40	-/450 кГц	256	P = 0,95
25	Gemini Corp.	Gemini NBi	0,5-120/ 4000	130	=, 20-75	37	14,6/9,5	145x225x 336	5-30/620 кГц		РПД = 10 мм, УРЛ = 1°, РПУ = 1°, (+5) – (+ 50) °С, ВПЕ для H = 80 м (или VDSL для H до 1000 м).

Примечания: D – дальность действия, H – глубина погружения, U – напряжение питания, $P_э$ – энергопотребление, ДКС – длина кабеля связи, P – вероятность распознавания, ВПЕ – возможность подключения Ethernet, УРЛ – угол раскрытия луча, ШЛ – ширина луча, РПД – разрешение по дальности, РПУ – разрешение по углу, Δt – диапазон рабочих температур, НБ – надводный блок.

Вопросы производства ЗВ в России

Минпромторг планирует запустить в России первое мелкосерийное производство отечественных 3D (трехмерных) ЗВ. В конце мая чиновники заказали изготовление образцов такого устройства. За работу они готовы заплатить 45 млн рублей. По их мнению, подрядчику предстоит сделать «уникальное устройство» (3D-звуковизор), аналогов которому нет [6].

Уникальность разрабатываемого локатора заключается в совмещении достоинств 2D- и 3D-звуковизора, что одновременно обеспечивает высокую производительность поиска (режим 2D) и высокое качество воспроизведения и распознавания подводного объекта по его объемному акустическому изображению (режим 3D), – рассказали «Известиям» в Минпромторге. Применять 3D-звуковизор планируют при поисково-спасательных и подводно-технических работах, обследовании подводных объектов, представляющих опасность, – таких, как мины, затопленные контейнеры с радиоактивными или иными вредными веществами. ЗВ может быть установлен на катере при поиске в мелководных районах или на телеуправляемых или автономных подводных аппаратах, – добавили представители министерства

В Минпромторге считают, что их устройство будет отличаться от похожих аналогов за счет габаритов. Зарубежных аналогов разрабатываемый ЗВ не имеет, если не считать 3D-гидролокатор Coda Octopus с массой 55 кг и габаритами 600х400х200 мм. Масса разрабатываемого ЗВ не должна превышать 5 кг при диаметре до 120 мм и длине до 200 мм. Известные ЗВ DIDSON и BlueView являются двумерными, – пояснили в министерстве [6].

При этом должны быть приняты во внимание такие важные параметры ЗВ, как максимальная глубина погружения, дальность действия, угол обзора, кадровая скорость, быстродействие – оптимальная частота кадров [6].

Основные характеристики современных ЗВ

Акустический метод наблюдения, на котором основана работа ЗВ, обеспечивает получение изображения дефектов в плоском и псевдотрехмерном виде в режиме реального времени и при ограниченной видимости. В результате развития технологий изготовления акустических преобразователей и разработки высокопроизводительных систем обработки данных удалось создать компактные гидроакустические системы с высокой разрешающей способностью – ЗВ. Данные устройства фактически

представляют собой миниатюрные многолучевые гидролокаторы, работающие на высокой частоте (от 450 кГц до 2,25 МГц). При работе в реальном режиме времени оператору выводится изображение подводного пространства с качеством, близким к изображению видеокамеры, при этом скорость сканирования (обновления) изображения составляет до 30 кадров/секунду. Дальность работы данных устройств может составлять десятки метров. Современные ЗВ отличаются от других гидроакустических средств прежде всего высоким пространственным разрешением (не хуже 1° по углу и нескольких сантиметров по дистанции), позволяющим выделить не только отметку в направлении объекта, но и его форму. Кроме того, от широко распространенных гидролокаторов бокового обзора и многолучевых эхолотов ЗВ отличает способность формировать акустическое изображение в режиме реального времени. Эти устройства хотя и могут быть использованы для построения акустического изображения подводных объектов, но лишь при условии механического перемещения антенны с последующим синтезированием акустического изображения по многим посылкам гидролокационного сигнала. Для проведения инструментального обследования акустическим методом специалисты компании «Тетис Про» (РФ) представляют новый функциональный, компактный отечественного производства с рабочей частотой 900 кГц. Данный ЗВ по техническим характеристикам не уступает лучшим зарубежным аналогам, получившим распространение на российском рынке, что особенно актуально в связи с затруднением поставок импортного оборудования и курса страны на импортозамещение. ЗВ «Тритон 900» воспроизводит акустическое изображение подводных объектов: двумерное 2D – при поиске; трехмерное 3D – при распознавании. В 2D-ЗВ пространственное разрешение обеспечивается либо только по двум угловым координатам (УУ-ЗВ), либо по одному углу и дистанции (УД-ЗВ). В 3D-ЗВ обзор пространства осуществляется по всем трем координатам. Из особенностей данного аппарата можно выделить небольшую массу: в воздухе она составляет всего 2 кг, а в воде – 0,5 кг; компактные габариты подводного модуля – 110×180 мм и низкое энергопотребление – всего 20 Вт. Для работы со ЗВ было разработано простое и понятное для пользователя программное обеспечение. Благодаря уменьшению времени распространения звука до границ просматриваемой области, а именно – дальности действия до 30 м рабочей частоты 900 кГц. ЗВ «Тритон 900» позволяет воспроизводить изображение с высоким разрешением за небольшой промежуток времени. ЗВ «Тритон 900» может использоваться не только как средство поиска и обследования объектов в условиях ограниченной видимости на дне и в толще воды, но и для обеспечения

поисково-спасательных работ. Оборудование может работать как в режиме «стопа», например при спуске на штанге или стационарной установке на подводном объекте или дне, а также при движении в режиме установки на судне-носителе, подводном аппарате или водолазе. Передача данных на поверхность осуществляется по кабелю. Для удобства пользования данным ЗВ заказчику может поставляться дополнительное оборудование: ноутбук стандартного либо ударо-влагозащищенного исполнения, установочная штанга, кабельная вьюшка [7]. Об основных свойствах ЗВ класса «Тритон» речь пойдет ниже.

Рассмотрим теперь основные тенденции развития ЗВ в составе комплексов автономных и телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов.

Решение государственных задач обеспечения энергетической безопасности и национальных интересов в борьбе за морские ресурсы обусловлено использованием современных подводных технологий, средств и систем. Значительная удаленность от берега, большая рабочая глубина, суровые климатические условия, сложность рельефа дна сильно ограничивают возможность использования водолазов и традиционных видов подводной техники. Для проведения работ в таких условиях наиболее перспективным является применение телеуправляемых (ТНПА) и автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) [8].

Очевидно, что в наступившем веке работа под водой – это функция робототехнических систем. За последнее десятилетие в мировой практике развития передовых подводных технологий. произошли значительные положительные сдвиги в области энергетики, микроэлектроники, механотроники, информационных технологий. Современные управляющие системы вышли на качественно новый этап развития, характеризуемый применением новейшей микропроцессорной элементной базы и созданием на ее основе автономных, интеллектуальных, роботизированных систем [8]. Возросшие технические возможности современных подводных автономных и телеуправляемых аппаратов позволяют производить, в дополнение к изложенному выше [8]:

- поисково-обследовательские работы, включая поиск и обследование затонувших объектов, инспекцию подводных сооружений и коммуникаций, трубопроводов, кабелей;
- геологоразведочные работы, включающие фото и видеосъемку, акустическое профилирование и картографирование рельефа дна;

- подледные работы, в том числе прокладка трубопроводов и кабеля, обслуживание систем наблюдения и освещения подводной обстановки;
- океанографические исследования, мониторинг водной среды;
- работы военного назначения, включая противоминную борьбу, противолодочную разведку, поиск аварийной подводной лодки, лежащей на грунте, патрулирование и обеспечение безопасности акваторий, имитацию подводных акустических целей.

Гидроакустические приборы давно вошли и прочно закрепились в составе оборудования ТНПА и АНПА. Современные подводные телеуправляемые аппараты, как правило, оснащаются гидролокатором кругового обзора, альтиметром и ЗВ, автономные необитаемые аппараты, оснащаются впередсмотрящим гидролокатором, гидролокатором бокового обзора, доплеровским измерителем скорости в комплексе с инерциальной навигационной системой, гидроакустическим модемом и гидроакустической системой навигации с длинной или ультракороткой базой [8].

Гидроакустические приборы используются для решения следующих задач [8]:

- навигация ТНПА в условиях плохой видимости (ЗВ и ГКО);
- определение и отображение на борту обеспечивающего судна текущего местоположения аппарата в условиях мелкого и глубокого моря (доплеровский лаг с ИНС, ГАНС, г/а модем);
- безопасное плавание и выполнение поставленных задач вблизи дна и донных препятствий (впередсмотрящий гидролокатор, многолучевые системы);
- управление ходом выполнения поставленных задач с борта судна и получение на борту судна необходимой информации о состоянии систем аппарата (г/а модем);
- высокоскоростной обмен информацией в группировке автономных аппаратов между собой и судном по гидроакустическому каналу связи (г/а модем);
- системы сбора данных (ГБО, многолучевые эхолоты, профилемеры, ИГБО, ГБО с синтезированной апертурой).

В результате развития технологий удалось создать компактные гидроакустические системы с высокими быстродействием и разрешающей способностью, акустические видеокамеры или ЗВ. Данные устройства представляют собой миниатюрные многолучевые гидролокаторы, работающие на высокой частоте (от 450 кГц до 1 Мгц), скорость обновления изображения составляет до 25 кадров/секунду. Дальность работы данных устройств может составлять десятки метров. ЗВ Gemini 720i показал способность демонстрировать приемлемое качество акустического

изображения на дальности до 120 м. Малая масса и габаритные размеры делают его идеальным выбором для установки на АНПА и ТНПА [8].

- режимы работы: автоматический, полуавтоматический, ДП;
- оптимальное управление в любых условиях, включая подстройку на изменение полезной нагрузки;
- выполнение заранее спланированной миссии. Идеально подходит для проведения гидрографической съемки;
- выполнение автоматического инспектирования, опор, протекторов, райзеров и якорных цепей.

Другой продукт разработанный компанией Seebyte: это модуль AutoTracker , который уже прошел успешные испытания на АНПА GAVIA. Модуль позволяет АНПА в автоматическом режиме проводить поиск и осмотр трубопроводов и обеспечивая поддержание постоянной дистанции между АНПА и трубопроводом, используя информацию, получаемую от установленных на борту АНПА ЗВ (фотокамеры) и гидролокатора бокового обзора. В 2006 г. установлен рекорд, аппарат автономно прошел по трубе 22,2 км [8].

Особую роль играет применение ЗВ при обследовании гидротехнических сооружений (ГТС). Вовремя не выявленные и не устраненные дефекты и повреждения нередко перерастают в серьезные конструктивные нарушения гидротехнических сооружений, что приводит к невозможности их дальнейшей эксплуатации. Поэтому важно правильно и своевременно оценить состояние сооружения и предусмотреть мероприятия по ремонту его повреждений на ранней стадии. Инструментальное обследование подводной части конструкций гидротехнического сооружения выполняется с целью более глубокой оценки его технического состояния и предусматривает выявление дефектов, повреждений сооружения, не фиксируемых при обычном визуальном обследовании, и рассматривается как замена или дополнение к обозначенному выше способу. При инструментальном обследовании используются специальные методы и соответствующие технические средства, выбор которых осуществляется в зависимости от вида обследуемого объекта и условий его работы [9].

На сегодняшний день модельный ряд ЗВ представлен двумя моделями: многолучевой гидролокатор-звуковизор Blue View и Водолазная высокочастотная гидроакустическая станция «Didson». Многочастотный гидролокатор-ЗВ Blue view - многолучевая высокочастотная гидроакустическая система с высокой разрешающей способностью, предназначенная для дополнительного поиска и классификации

подводных объектов в режимах работы с подводных аппаратов или надводных средств. Система обеспечивает: Обнаружение подводных объектов на дне и в толще воды на дальностях до 150 м. Получение гидроакустического изображения объектов и определение координат: пеленг, дистанция. Отображение данных на мониторе оператора с возможностью сохранения и последующего просмотра. При установке на катере возможен монтаж самой антенны на автоматической поворотно-наклонной платформе, которая управляется при помощи программного обеспечения гидролокатора, и позволяет управлять и удерживать антенну в заданном положении при движении катера. Дополнительно может поставляться: подводная консоль отображения, штанга с ручным или автоматическим управлением наклона/поворота гидролокатора, блок автономного питания [10].

В 2000-х годах широкое распространение за рубежом получили гидролокаторы бокового обзора (ГБО) и многолучевые эхолоты (МЛЭ). Они использовались как профилографы (приборы, строящие профиль дна), и как средства поиска затонувших объектов. Принцип работы этих приборов представлен на рис. 19а, б. Здесь представлены сектора обзора ГБО и МЛЭ. Однако, несмотря на малые габариты, современные ГБО и МЛЭ не могут использоваться водолазом. Они могут быть размещены только на подводных аппаратах, поскольку при их использовании необходима высокая стабильность курса, крена и дифферента, иначе картинка будет смазана. Для поиска затонувших предметов водолазам более всего подходят подводные ЗВ [11].

В середине 80-х годов НИИ «Риф» (г. Бельцы. Молдавской ССР) была выполнена НИР «Маска» в результате которой был создан первый отечественный ЗВ. Он работал на принципе акустической линзы с электронно-акустическим преобразователем (разработки АКИН, Москва) и давал изображения на экране электронно-лучевой трубки, которые иногда позволяли произвести классификацию (опознавание) объекта. Однако он имел значительные габариты и высокую стоимость и потому не получил дальнейшего развития [11].

Сейчас, на современной элементной базе (матрицы ПЗС с пьезокерамическими элементами, выполненные по типу стёкол первых смартфонов нажимного действия (теперь применяют стёкла ёмкостного действия)) можно создать недорогие и малогабаритные пьезочувствительные матрицы, позволяющие с высокой разрешающей способностью и чувствительностью улавливать звуковые волны, отражённые от

подводных объектов. Т.е. может быть создан недорогой и эффективный ЗВ фронтального обзора (также, как и у фотоаппарата) [11].

За рубежом в 80-е годы пошли по пути создания ЗВ на принципах МЛЭ. Они получились меньше в размерах и дешевле, однако они не позволяют рассмотреть объект с фронтальной позиции, а позволяют рассмотреть только сверху [11].

Позже на принципах МЛЭ и в НИИ «Риф» был создан ЗВ «Нептун», который по своим техническим характеристикам был близок к английскому ЗВ «BLUE VIEW». ЗВ «Нептун» обеспечивал получение гидроакустического изображения объектов и определение пеленга и дистанции; отображение данных на мониторе с возможностью сохранения и последующего просмотра [11].

Основные технические параметры этого ЗВ представлены в таблице 1. Блок-схема подводного ЗВ «Нептун» показана на рисунке 7.

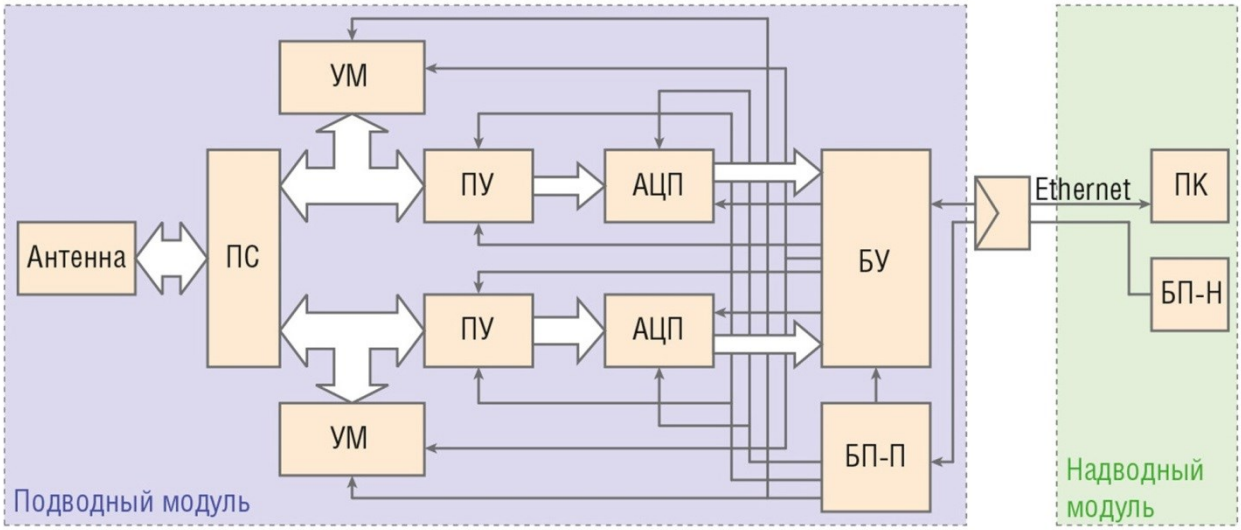
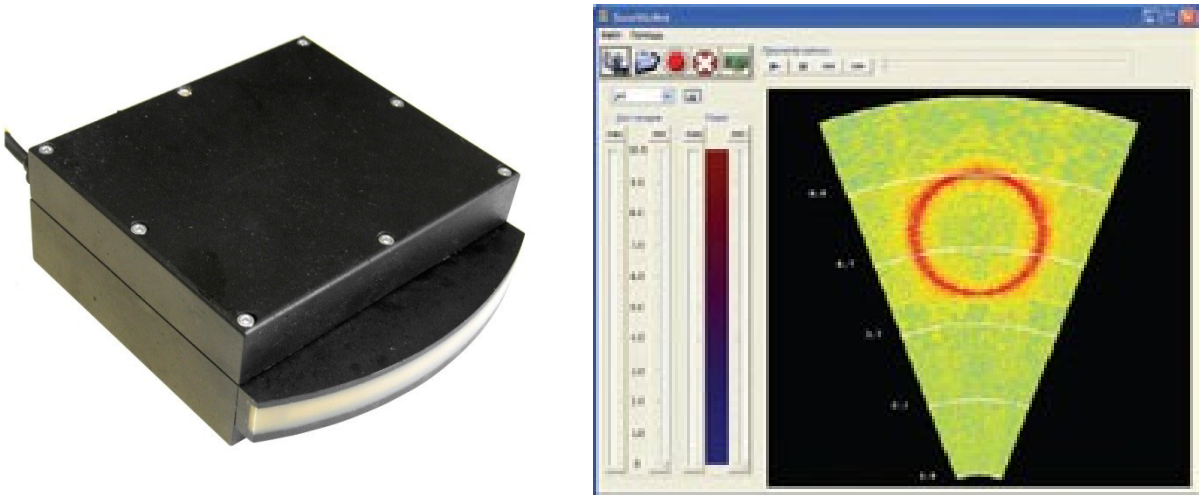


Рисунок 7 – Блок-схема подводного ЗВ Нептун: ПУ – приемный усилитель, УМ – усилитель мощности, БУ – блок управления, БП-П – блок питания подводного модуля, БП-Н – блок питания надводного модуля, ПК – персональный компьютер

Внешний вид ЗВ «Нептун» показан на рисунке 8*а*, пример изображения на экране – 8*б*.



а) б)

Рисунок 8 – ЗВ «Нептун»: *а* – внешний вид; *б* – пример изобразения на экране

Высокочастотный ЗВ «Нептун» являлся полноценным ЗВ с функцией формирования двухмерного видеоизображения лежащего на грунте предмета. С помощью такого ЗВ легко идентифицировать объекты в воде с нулевой прозрачностью. Прибор был предназначен для водолазов, а также для применения в подводных системах безопасности. На рисунке 8*б* показано изображение автомобильной шины, лежащей на грунте, на экране монитора ЗВ «Нептун» с дистанции 6-8 м в воде с нулевой прозрачностью [11].

В настоящее время за рубежом создано несколько типов ЗВ на принципах МЛЭ. В нашей стране после распада СССР ЗВ не производятся.

Недостатками созданных в 80-х годах у нас и за рубежом ЗВ фронтального действия с электронно-лучевыми акустическими преобразователями и звуковыми линзами, является низкое качество изображений, не позволяющее классифицировать предмет. Мы видим только те части изображения, которые отражают акустические волны в нашу сторону. В основном это отдельные блики, подобные тому, как ночью электрический фонарик выделяет только отражающие свет части объекта. По существу, это бликовизор, который редко позволяет распознать обнаруженный объект [11].

Проблема заключается в том, что под водой отсутствуют фоновые звуковые засветки, создающие сплошную звуковую освещённость (в отличие от солнечного света на Земле, рассеянного атмосферой). Но выход из такой ситуации возможен и, причём, несколькими путями [11].

На малых глубинах можно использовать поверхностную реверберацию (отражение звука от поверхности моря) для создания фоновой засветки. Для этого

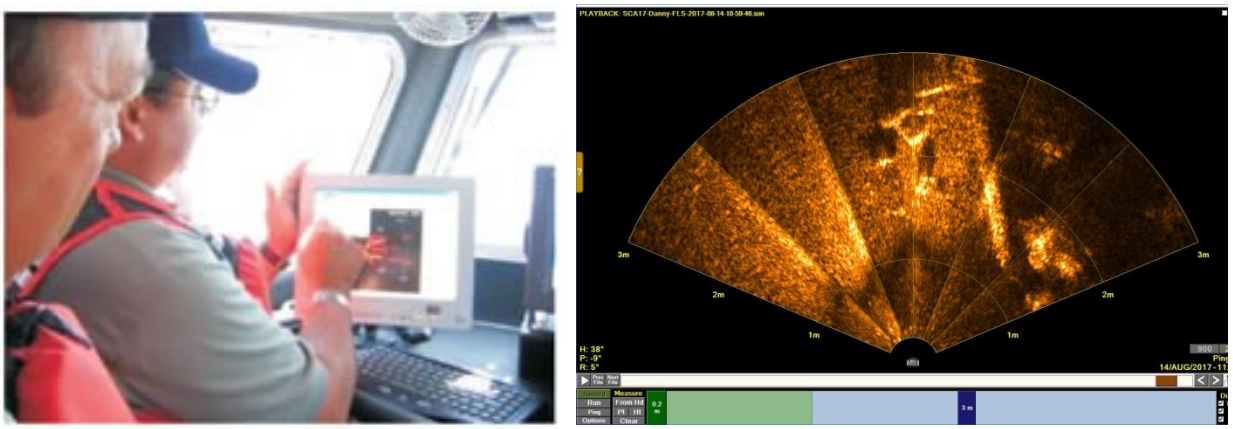
излучатель ЗВ направляется в сторону поверхности воды под определённым углом, а приёмные каналы по-прежнему смотрят на объект. Затем излучается мощный короткий импульс. Отражённые от поверхности звуковые волны облучают объект под разными углами, поскольку отражаются от поверхности разных морских волн. Это приводит к появлению фоновой засветки объекта и выявлению большого количества ранее не видимых деталей, но в основном в верхней части объекта. Вместе с прямыми (фронтальными) засветками, это позволит полнее выявить и классифицировать объект [11].

Другой путь – стробирование приёмника ЗВ по дальности. После первичного обнаружения объекта дистанция до него уже известна. Перед следующим импульсом ЗВ автоматически настраивается так, что приёмный канал запирается до прихода отражённого сигнала с дальности немного (на несколько сантиметров) большей предыдущей. Теперь первичные блики от объекта уже не высвечиваются, а принимаются более дальние отражённые сигналы. Тем самым высвечивается та часть объекта, которая даёт отражения меньшей интенсивности. Так повторяется несколько раз, пока объект не будет полностью перекрыт стробированием по дальности.

В конце этой процедуры можно увидеть только отражения звука от зоны объёмной реверберации, находящейся за объектом. Перед ней будет тёмный силуэт объекта. Перевернув изображение на негатив, мы получим светлый силуэт объекта на тёмном фоне объёмной реверберации. Наложив ранее полученные изображения друг на друга, и обработав, можно получить более качественное изображение объекта. Недостатки - требуется большая мощность зондирующих импульсов для получения эффективной засветки от донной, объёмной и поверхностной реверберации и многократное лоцирование объекта [11]. Следует отметить, что объёмная реверберация особенно велика в прибрежных мелководных морских районах, где много планктона, взвеси из воздушных пузырьков и частиц ила. Это позволит сделать предложенный метод вполне эффективным в прибрежных районах морей и океанов [11]. Следующий вариант – это облучение объекта с разных ракурсов ЗВ двух, трёх водолазов и передача полученных изображений в единый центр обработки информации (например, на катер), а затем трансляция их водолазам в паузах между импульсами. Так разные изображения совмещаются, и получается более информативная картинка [11]. Передача изображений в звуке возможна только на малых дистанциях. Частоты могут быть выше, чем у дельфинов (300 - 500 кГц) и мощности выше. Наложение изображений с разных ракурсов от разных водолазов позволит создать объёмное голографическое

изображение предмета, что улучшит его распознавание. Конечно, чёткость картинки будет не та, что в оптике, но работать с ней можно. Передавать надо только те пиксели, в которых сигнал больше нуля. Это позволит уменьшить объём передаваемой информации [11]. Если ЗВ только один, то можно использовать взрывные источники звука, срабатывающие на разных ракурсах от объекта. Для этого можно использовать автомат подводной стрельбы АПС (калибр 5,66 мм) или пистолет СПП-1М, (калибр 5,45 мм) стреляющие иглами, длина игл 120 мм, но стрелять нужно другими, специальными иглами, которые взрываются на небольшом расстоянии от водолаза (наподобие новогодних хлопушек). Водолаз поворачивает пистолет в разные стороны и стреляет, то влево и вверх, то вправо и вниз. ЗВ принимает отражённые сигналы от разных источников звука и строит картинки с разных ракурсов, а потом совмещает их и обрабатывает, получая комплексное изображение объекта [11]. Можно создать специальные многозарядные иглы с двумя или тремя зарядами, взрывающимися поочерёдно на дистанциях 2 - 3, 5 - 7 и 10 - 15 м. В этом случае мы получим за один выстрел два - три разных источника звука и до четырёх ракурсов облучения подводного объекта (первый ракурс от ЗВ водолаза), что существенно повысит качество изображения [11]. Применяя искусственный интеллект для обработки полученных снимков, можно по нему построить изображение объекта близкое к фотографическому. Конечно, оно будет менее чётким по сравнению с фотографией, сделанной обычным подводным фотоаппаратом в прозрачной воде [11].

Выше уже упоминалось о многолучевом гидролокаторе-звуковизоре BLUE VIEW. Bluview - многолучевая высокочастотная гидроакустическая система с высокой разрешающей способностью, предназначенная для дополнительного поиска и классификации подводных объектов в режимах работы с подводных аппаратов или надводных средств. Система обеспечивает: Обнаружение подводных объектов на дне и в толще воды на дальностях до 150 м. Получение гидроакустического изображения объектов и определение координат: пеленг, дистанция. Отображение данных на мониторе оператора с возможностью сохранения и последующего просмотра. При установке на катере возможен монтаж самой антенны на автоматической поворотно-наклонной платформе, которая управляется при помощи программного обеспечения гидролокатора, и позволяет управлять и удерживать антенну в заданном положении при движении катера [12]. Работа оператора с надводным блоком ЗВ Blue View показана на рисунке 9*а*, пример изображение на экране дисплея на рисунке 9*б*.

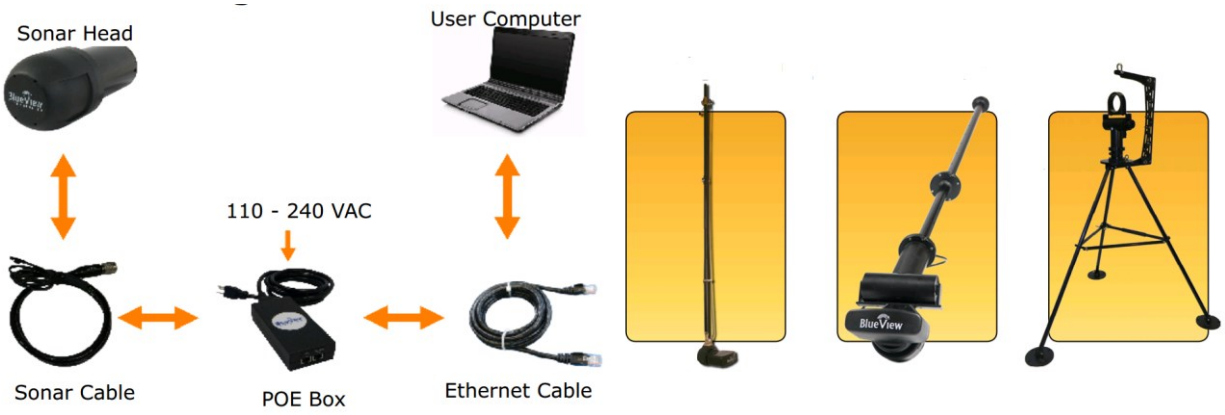


а) б)

Рисунок 9 – 3B Blue View: *а* – работа оператора с надводным блоком, *б* – изображение на экране дисплея

Многолучевые глубоководные 2D PD серии Bluview P900, рисунок 10, имеют более высокую дальностью обследования, по сравнению с PD серии «M», при этом обладает широким углом обзора. 3B BlueView M900 - 130 имеет самый широкий угол обзора 130° и разработан, для использования в небольших, ограниченных пространствах [12].

Модель обладает максимальной дальностью обследования (до 100 м), при этом сохраняя четкое изображение в режиме реального времени на средних и дальних дистанциях. Эта система с большой дальностью действия позволяет оператору обнаруживать, отслеживать и контролировать ситуацию задолго до приближения к тому или иному объекту. Гидроакустические данные съемки отображаются в режиме реального времени на ПК. С помощью гидролокатора возможно идентифицировать и объекты в воде с нулевой видимостью.



а) б)

в)

Рисунок 10 – ЗВ Blue View P900: *а* – комплект: верхний ряд, слева направо: головная часть – подводный модуль, персональный компьютер, средняя часть, в центре: напряжение питания ~ 110-240 В, нижний ряд, слева направо: кабель ЗВ, блок питания ЗВ, кабель для подключения к сети Ethernet; *б* – ЗВ, закрепленный на штанге; *в* – ЗВ в руках водолаза армии США

Серия высокочастотных гидролокаторов BlueView P900 является отличным решением для поисковых операций и навигации в условии низкой видимости и работает на частоте 900 кГц. ЗВ Bluview P900 может быть смонтирован на штанге, с возможностью управления наклонно-поворотной платформой (360º поворот, 180º наклон, с точностью до 1º). Сформированная система является наиболее компактной и универсальной подводной системой технического зрения и может быть использована прямо с лодки или катера при нулевых условиях видимости. Штанга выдвигается на длину до 2-х метров и может работать на скорости до 5 узлов. Так же ЗВ может быть установлены в водолазную панель для навигации в мутной воде. Применение: обнаружение объектов; навигация; предупреждение столкновений с препятствиями в

толще воды; осведомление об обстановке под водой; мониторинг проведения водолазных работ; обследование подводных участков; мониторинг дна; обнаружение или слежение за водолазами. Преимущества: расширенный диапазон обнаружения; расширенная зона покрытия; улучшенная идентификация целей и объектов; быстрая и простая сборка для дальнейшей эксплуатации; минимальные требования для монтажа гидролокатора на смежное оборудование. Особенности: потоковое видео; стандартное Ethernet подключение; функция «включил и поехал»; интуитивно понятное программное обеспечение на базе Windows®; программное обеспечение, разработанное специально для использования ЗВ BlueView [12].

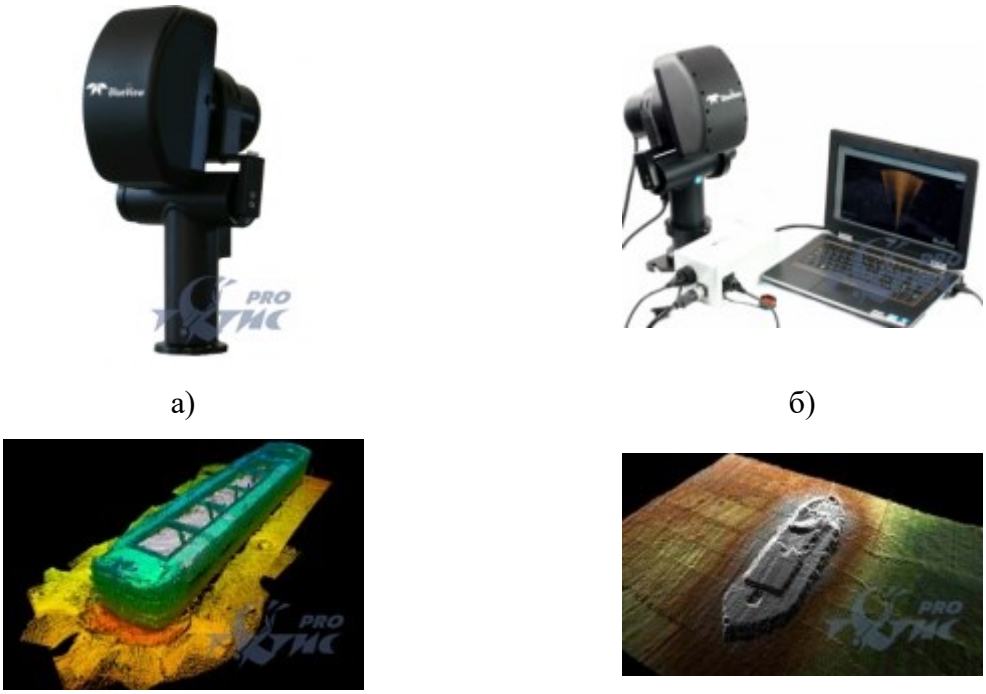
BlueView серии M900 являются самыми полнофункциональными и компактными в своей нише многолучевых гидролокаторов, транслирующих 2D изображение. ЗВ BlueView M900 разработан, для использования в небольших, ограниченных пространствах. Многолучевые гидролокаторы серии «М» по габаритным размерам на 30% меньше, чем популярные ЗВ серии «Р», и обеспечивают такое же четкое 2D изображение, в режиме реального времени. Применение: обнаружение объектов; предупреждение столкновений с препятствиями в толще воды; осведомление об обстановке под водой; мониторинг проведения водолазных работ; обследование подводных участков; мониторинг дна; обнаружение или слежение за дайвером/водолазом. Преимущества: этот ЗВ на 30% легче, чем в серии «Р», низкое энергопотребление; автоматическая настройка уровня мощности передачи сигнала для улучшения изображения с близкого и дальнего расстояния; режимы вещания UDP (User Datagram Protocol); небольшие габариты; расширение области охвата; высокое разрешение изображения; легкая автоматизация систем навигации и контроля. Особенности: потоковое видео; непрерывный контроль за ситуацией под водой; номинальная глубина погружения 1000 м; функция «включил и поехал»; интуитивно понятное программное обеспечение на базе Windows®; программное обеспечение, разработанное специально для использования ЗВ BlueView. Подключения: стандартное соединение Ethernet; через VDSL (по выбору заказчика); питание = 12-48 В[12].

Модельный ряд ЗВ BlueView P450 имеет более высокую дальностью обследования, чем ЗВ серии «М», при сохранении широкого угла поля обзора. ЗВ данной серии обладают максимальной дальностью обследования (до 300 м), при этом сохраняя четкое изображение в режиме реального времени на средних и дальних дистанциях. Эта система с большой дальностью действия сконструирована для того, чтобы оператор мог обнаруживать, отслеживать и контролировать ситуацию задолго до

приближения к тому или иному объекту. Гидроакустические данные съемки отображаются в режиме реального времени на ПК. С помощью гидролокатора возможно идентифицировать и объекты в воде с нулевой видимостью. ЗВ серии BlueView P450 обладают небольшими габаритными размерами, при этом являются полноценными ЗВ с функцией формирования двухмерного видеоизображения, работающими на частоте 450 кГц. Применение: обнаружение объектов; навигация; предупреждение столкновений с препятствиями в толще воды; осведомление об обстановке под водой; мониторинг проведения водолазных работ; обследование подводных участков; мониторинг дна; обнаружение или слежение за водолазами. Преимущества: расширенный диапазон обнаружения; расширенная зона покрытия; улучшена идентификация целей и объектов; быстрая и простая сборка для дальнейшей эксплуатации; минимальные требования для монтажа гидролокатора на смежное оборудование. Особенности: потоковое видео; стандартное Ethernet подключение; функция «включил и поехал»; интуитивно понятное программное обеспечение на базе Windows®; программное обеспечение, разработанное специально для использования ЗВ BlueView [12]

Модель 3D серии BV5000, рисунок 11, относятся к ЗВ механического сканирования, транслирующая 3D изображение. ЗВ позволяют сканировать подводные участки, структуры и объекты, создавая изображение высокого разрешения. Благодаря интуитивно понятному интерфейсу программного обеспечения, новые 3D ЗВ BV5000 дают прекрасную возможность операторам, не обладающим специальной подготовкой, руководствоваться данными, которые поступают от сонара в процессе обследования подводных участков. Благодаря небольшим габаритам и маленькому весу 3D ЗВ с легкостью устанавливается на ТНПА. 3D ЗВ, установленный на специальную механическую штангу с поворотным механизмом на 360° и возможностью изменения угла наклона ЗВ, фактически, позволяет охватывать сферообразное пространство сканирования. Применение: осмотр участков в 3D изображении, инспекция структуры объектов в 3D изображении, применение в нефтегазодобывающей отрасли, осмотр мостовых опор. Особенности: стандартное подключение посредством Ethernet/RS485, интуитивно понятный интрефейс программного обеспечения, входящий в комплект с оборудованием, поддержка программного обеспечения Leica Cyclone, возможность сканирования как отдельных участков, так и сферообразное сканирование. Преимущества: простота в использовании. сканирование в одно нажатие, уникальная возможность использования ЗВ в разных местах с последующей склейкой изображений

для получения единого изображения, простое комбинирование изображения, полученное со ЗВ и поверхностного лазерного сканера, компактный размер 3D ЗВ позволяет устанавливать его в труднодоступных местах, сканирование при низкой или нулевой видимости [12].



а) б)

в) г)

Рисунок 11 – ЗВ 3D серии BV 5000: *а* – внешний вид, *б* – комплект этого ЗВ, *в* – изображение в условных цветах, *г* – изображение судна в условных цветах

Внешний вид ЗВ Blue View 320-M900 показан на рисунке 12.

Рисунок 12 – ЗВ Blue View 320-M900

Гидроакустическая станция «Didson» (звуковизор), рисунок 13, предназначена для получения качественного изображения подводных объектов в условиях плохой видимости, когда оптические системы крайне неэффективны [12]. Назначение: получение акустического изображения целей с высоким разрешением и передача

изображения на монитор поста наблюдения либо на монитор водолаза. Область применения данного оборудования - проведение подводно-обследовательских работ. ЗВ используется в качестве инженерно-технических средств систем физической защиты, для предотвращения несанкционированного подводного доступа на важные прибрежные объекты. Преимущества системы перед существующим оборудованием:

- Компактность системы. Система имеет небольшие массогабаритные характеристики, может размещаться непосредственно на водолазе или на катерах малого (среднего) водоизмещения или подводных аппаратах без необходимости проведения корпусных и модернизационных работ.
- Малое энергопотребление за счет использования современных электронных материалов. Система имеет малую мощность энергопитания, что позволяет ее использовать в автономном режиме длительный срок.
- Возможность работы в двухчастотном режиме, который позволяет системе, работая на низких частотах, обеспечивать большую дальность обнаружения цели, при меньшей разрешающей способности, работая на высоких частотах обеспечивать лучшее качество изображения при меньших дальностях обнаружения цели.
- Простата применения. Работа со ЗВ не требует специальных знаний [12].

а) б)

Рисунок 13 – ЗВ DIDSON: *а* – внешний вид, *б* –положение в руках оператора

Мобильные поисково-обследовательские комплексы «Наутилус» на базе ЗВ Тритон-900, рисунок 14, служат для профессионального использования службами МЧС и спасательными формированиями и является идеальным средством для проведения поисковых и спасательных операций, обследования внутренних вод (рек/каналов/озер) и портовых зон в рамках мероприятий по обеспечению поиска

объектов на дне и в толще воды на глубинах до 100 м. в условиях плохой видимости. Характеристики ЗВ также позволяют применять его при поиске тел погибших. Работа ЗВ показана на рисунке 15.

а) б)

Рисунок 14 – ЗВ Наутилус: а – подводный комплекс, б – надводный системный блок

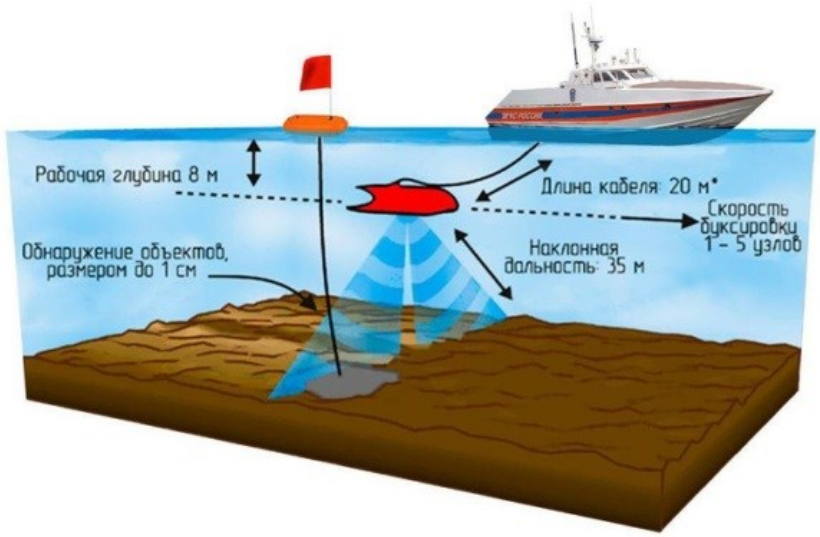


Рисунок 15 – Работа ЗВ Наутилус компании “Тетис Про” для обнаружения объектов на дне моря с борта судна; ЗВ входит в состав системы STARFISH-990F-1

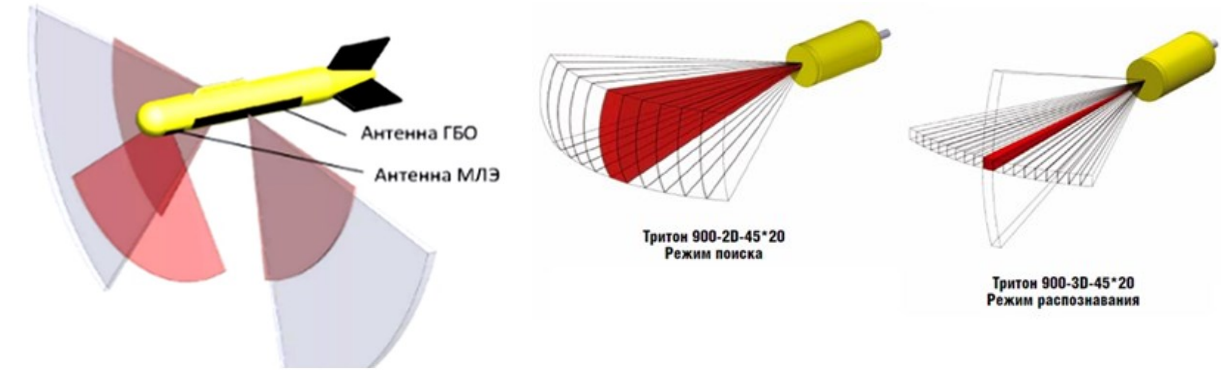
ЗВ «Тритон-900», рисунок 16, представляет собой компактную гидроакустическую систему с рабочей частотой 900 кГц, позволяющую получать акустическое изображение подводных объектов: двухмерное 2D – при поиске; трехмерное 3D – при распознавании. Схема работы ЗВ Тритон показана на рисунке 17. Для визуализации информации, поступающей от многолучевого ЗВ «Тритон-900»,

используется надводный системный блок, оснащенный удобным и понятным интерфейсом на базе операционной системы Windows. В режиме реального времени на монитор оператора выводятся изображения подводного пространства с качеством близким к изображению видеокамеры. При этом скорость сканирования (обновления) изображения составляет до 30 кадров в секунду.

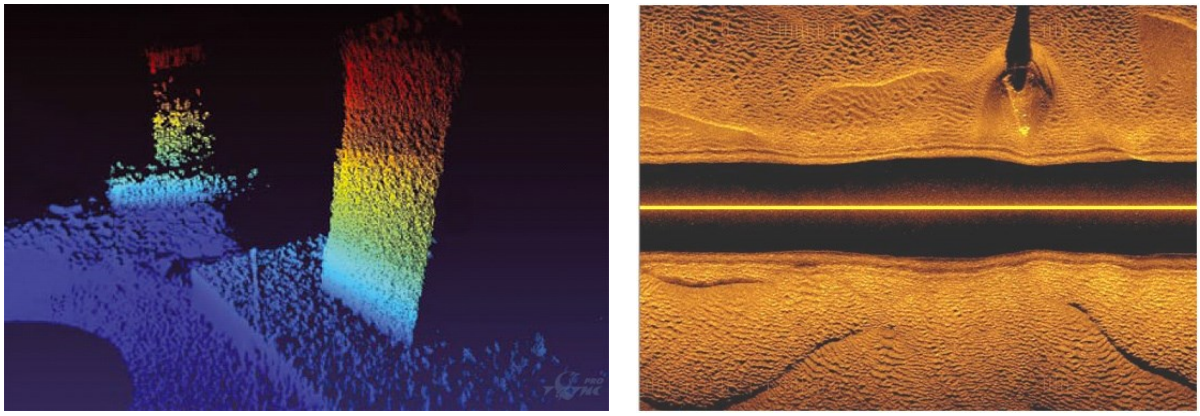
а) б)

Рисунок 16 – ЗВ Тритон 900: *а* – в укладочном ящике, *б* – подводный блок вместе с кабелем

Особенности: универсальность внешнего питания 12/24/36 В постоянного тока или 220 В переменного тока; обеспечение автономной работы в течение четырех часов; корпус выполнен из ударопрочного и влагозащитного материала и имеет антибликовый экран. Быстрая динамическая визуализация позволяет успешно использовать «Тритон-900» в качестве средства навигации в условиях плохой видимости для предотвращения столкновений ТНПА/АНПА либо судна-носителя с различными препятствиями. Комплекс активно применяется при проведении поисковых операций, в том числе при поиске тел погибших [12].



а) б)



в) г)

Рисунок 17 – Схема работы ЗВ Тритон: а – сектора обзора ГДО и МЛЭ, б – работа в режиме поиска, в – изображение в ЗВ, г – вид затонувшего объекта на экране дисплея ГБО (в центре – темная мертвая зона)

2D ЗВ «Тритон-900» является функциональным и компактным. ЗВ воспроизводит акустическое двумерное изображение подводных объектов при поиске. Подходит для обнаружения объектов на дне и в толще воды и обеспечения «Тритон-900» является функциональным и компактным ЗВ. Воспроизводит акустическое двумерное изображение подводных объектов при поиске. Подходит для обнаружения объектов на дне и в толще воды и обеспечения поисково-спасательных работ. Исполнение: Тритон-900 2D 45x20 – работа в режиме двухмерного изображения. Варианты установки и использования: в ручном режиме при помощи штанги, использование с борта судна-носителя, пирса и т.д.; установка на ТНПА либо на любой другой подводный аппарат. Особенности: небольшая масса, габариты и низкое энергопотребление; простое и понятное программное обеспечение; высокое разрешение изображения [12].

3D ЗВ «Тритон-900» является функциональным и компактным ЗВ. Воспроизводит трехмерное акустическое изображение подводных объектов при их распознавании. Подходит для обнаружения объектов на дне и в толще воды и для обеспечения поисково-спасательных работ. Исполнение: Тритон-900-3D-45х20 имеет режим работы в 3D – т.е. создает трехмерное изображение. Варианты установки и использования: в ручном режиме при помощи штанги, использование с борта судна-носителя, пирса и т.д.; установка на ТНПА либо на любой другой подводный аппарат. Особенности: небольшая масса и габариты, низкое энергопотребление; простое и понятное программное обеспечение; высокое разрешение изображения [12].

Использующий ЗВ телеуправляемый необитаемый подводный аппарат (ТНПА) МАРЛИН-350 – подводный аппарат легкого класса, рисунок 18, предназначен для наблюдения за охраняемой территорией, поиска и обнаружения объектов (нарушителей) на подконтрольной территории и выполнения иных профессиональных операций, связанных с пресечением попыток незаметного проникновения на охраняемый объект. Особенности и преимущества: используются передовые технологии и современная элементная база; используются магнитные муфты в движителях; соответствует последним мировым тенденциям построения подводных аппаратов; доступно расширение системы и установка дополнительного оборудования; возможность установки цифровой Full HD видеокамеры; быстро развертываемая, простая в обращении система; Состав изделия: подводный аппарат, состоящий из четырех горизонтальных двигателей, установленных по векторной схеме и двух вертикальных двигателей. ТНПА оборудован системой стабилизации курса и глубины, одностепенным манипулятором типа «схват», двумя аналоговыми видеокамерами и двумя светодиодными светильниками. ТНПА содержит подводный модуль, состоящий из стандартной стойки 13U, блока контроля изоляции питания ТНПА, 3-х ТВ мониторов для отображения видео- и гидроакустической информации, блока питания аппарата, блока цифровой регистрации и встроенного компьютера; Используется ручная лебедка, включающая алюминиевую раму и барабан, оптоэлектрический кабель длиной 450 м, оптоволоконный вращающийся переход и электрический вращающийся токосъемник; В состав ТНПА входит пульт ручного управления и дополнительное оборудование: гидролокатор кругового обзора; многолучевой гидролокатор - ЗВ; гидроакустическая система позиционирования; альтиметр; Full HD видеокамера; другое оборудование и датчики с интерфейсами [12].

а) б)

Рисунок 18 – Необитаемый телеуправляемый подводный аппарат Марлен-350: *а* – внешний вид, *б* – пульт управления

Известно, что системы подводного поиска, основанные на различных физических принципах, обладают различными возможностями (в основном по радиусу действия и степени избирательности) и по-разному зависят от воздействия гидрофизических факторов. В целях компенсации специфических недостатков, присущих отдельно рассматриваемым системам, а также и комплексам, состоящим из систем подводного поиска и носителей, создаются комбинированные системы [3].

Комбинированные системы подводного поиска могут подразделяться по нескольким признакам [3]:

- по поисковым каналам, когда в одной системе имеются поисковые каналы, работа которых основана на разных физических принципах;
- по носителям, когда системы либо размещаются на одном носителе, либо предназначаются для достижения единой цели и участвуют в одной поисковой операции, но связаны только функционально, а размещаются на разных носителях;
- по способу работы комбинируемых поисковых каналов, когда все каналы работают одновременно – параллельное включение – и когда постоянно работает один канал, а другой включается после его срабатывания – последовательное включение.

Комбинация по поисковым каналам осуществляется с таким расчетом, чтобы недостатки одного из них максимально компенсировались преимуществами другого. Покажем на примерах основные принципы комбинирования систем подводного поиска. Если поиск производится в районах с грунтами средней плотности, а небольшой металлический объект поиска может находиться как на поверхности грунта, так и в

толще его, то возможна комбинация электромагнитного (или магнитного – при поиске ферромагнитных объектов) канала с оптическим телевизионным. Пусть каналы будут работать одновременно – по принципу параллельного включения. В этом случае электромагнитный канал будет служить для обнаружения объектов и под слоем грунта, однако избирательность, т. е. возможность классифицировать объекты, будет относительно небольшой. Оптический канал будет обнаруживать объекты, находящиеся только на поверхности грунта, зато возможность классификации объектов будет весьма высокой. Комбинирование по носителям производится с использованием носителей различного типа. Наиболее распространенным сочетанием носителей систем подводного поиска являются: корабль – корабль; корабль – вертолет; корабль – самоходный снаряд; корабль – батискаф; корабль – водолаз; подводная лодка – самоходный обитаемый снаряд. Основным носителем систем подводного поиска является надводный корабль. Он служит платформой для размещения системы, производящей первичный поиск, он же является либо платформой для размещения системы г подводного поиска, производящей вторичный поиск, либо базой для обеспечения или размещения на нем носителя аппаратуры такой системы. Это объясняется тем, что корабль может обеспечить требуемую длительность проведения поисковой операции без необходимости возвращения на береговую базу, так как обладает высокой автономностью, тем, что он может обладать необходимым водоизмещением для размещения на нем громоздких и энергоемких систем и, наконец, тем, что при наличии современных средств кораблевождения и навигации надводному кораблю проще, чем любому другому средству, определять свое место в районе поисков, особенно когда этот район достаточно велик [3].

Главная проблема в том, что ЗВ не обеспечивает достаточно высокой дальности распознавания при неблагоприятных условиях видения (мутная вода, наличие облака планктона и др.). В связи с этим представляется целесообразным объединение ЗВ с подводным активно-импульсным телевизионным прибором ночного видения (АИ ТВ ПНВ) Lynx Lsv-w, рисунок 19 [13]. Принцип действия АИ ТВ ПНВ основан на импульсном лазерном подсвете наблюдаемого подводного объекта и синхронизированным с таким подсветом импульсным управлением (стробированием) электронно-оптического преобразователя в приемной части прибора. Прибор используется в качестве системы наблюдения на исследовательских подводных аппаратах, применяется для разведки полезных ископаемых, инспекции подводных трубопроводов, кабелей, скважин, поиска затонувших объектов, рыболовных сетей,

контроля за поголовьем рыбы и других морских обитателей. Электронно-оптический блок и лазер подсветки устанавливаются на подводной части судна. ТВ монитор и управляющий блок могут быть смонтированы на надводной части или на судне. АИ ТВ ПНВ обеспечивает: подавление дымки обратного рассеяния; возможность наблюдения в мутной воде; увеличение дальности видения до 6 раз, т.е. в два и более раза по сравнению с обычными подводными ТВ системами; обеспечение высококачественного теленаблюдения под водой; высокая надежность. Основные параметры АИ ТВ ПНВ представлены в таблице 2 [13].

Рисунок 19 – Подводный АИ ТВ ПНВ Lynx Lsv-w

Таблица 2 – Основные параметры АИ ТВ ПНВ Lynx Lsv-w

Разрешение		450 ТВ линий в воздухе	
Дальность видения в чистой воде (E=0,04 м$^{-1}$)		до 150 м	
Угол обзора		60° (F=14/2.3), 15° (F=37/1.1)	
Блок:	Камера	Монитор	Лазер
Размеры, мм	170x160x105	310x215x215	380x90x275
Вес, кг	3	7.5	12
Питание	12 В (от монитора)	220 В, 50 Гц	220 В, 50 Гц
Потребляемая мощность	-	50W	300W

Создание такого двухканального прибора позволяет существенно повысить дальность действия и расширить возможности работы под водой при неблагоприятных условиях видения.

Заключение

Перспективы развития современных ЗВ сводятся к следующему.

1. Дальнейшее развитие ЗУ связано с повышением качества акустического изображения и дальности действия, в также с снижением массогабаритных характеристик, для чего следует увеличивать рабочую частоту.
2. В перспективе необходимо создание двухканальных подводных приборов наблюдения, состоящих из ЗВ канала поиска и обнаружения объектов наблюдения, а также из активно-импульсного лазерного канала распознавания: это позволит обеспечивать работу под водой в широком диапазоне внешних условий.
3. В настоящее время наилучшим вариантом является создание двумерных ЗВ, обеспечивающих высокое качество изображения, минимальную массу и габариты, высокие эксплуатационные характеристики, минимальную стоимость; по этим причинам такие ЗВ получили широкое распространение.
4. Необходима разработка новых сигнальных процессоров для формирования достаточного числа узконаправленных лучей при использовании полностью заполненной двумерной антенны.
5. В перспективе представляется целесообразным дальнейшее развитие трехмерных ЗВ, выполненных на цифровых схемах и обеспечивающих оптимальную обработку изображения в реальном масштабе времени и повышение разрешающей способности.

Компромиссное соотношение между качеством акустического изображения и числом элементов антенны достигается при использовании крестообразной антенны (креста Миллса), одна из линеек которой является приёмной, а другая – излучающей. Результирующая характеристика направленности (ХН) такой приёмно-излучающей антенны в точности совпадает с ХН полностью заполненной плоской приёмной антенны, то есть при использовании такой антенны качество изображения будет соответствовать качеству изображения, получаемого при использовании двумерной, полностью заполненной антенны. Однако благодаря неизмеримо меньшему числу элементов задача оцифровки входных сигналов и формирования ХН существенно упрощается. Следовательно, волновые размеры антенны и соответственно её угловое разрешение можно существенно увеличить, а стоимость уменьшить.

Литература

1. Звуковизор – Автоматизированная Интернет-система формирования баз данных. [Электронный ресурс] URL: http://www.fpd.informsystema.ru. (дата обращения 09.06.25).
2. Принцип действия гидролокатора. Life-Prog [Электронный ресурс] URL: http://www.life-prog.ru.view_php.id=266. (дата обращения 09.06.25).
3. Звуковизионные системы. Системы, приборы и устройства для подводного Подводный поиска. [Электронный ресурс] URL: http://www. fizich.ru. (дата обращения 09.06.25).
4. Лекомцев В., Титаренко Д. Современные средства подводного звуковидения. СТА, 2011, № 3, с.36 – 46, (дата обращения 09.06.25).
5. А.В. Митько, Н.Н. Попов. Лабораторный практикум по дисциплине «Морские информационные системы». СПб, РГТМО, 2013, 45 с. [Электронный ресурс] URL: http:// www.researchgate.net. (дата обращения 09.06.25).
6. В России планируется организовать первое серийное производство трехмерных подводных звуковизоров. [Электронный ресурс] URL: http://www. ntcsis.ru. (дата обращения 09.06.25).
7. Ультразвуковая видеокамера для работы в условиях плохой видимости. [Электронный ресурс] URL: http://www. ovideo.ru. (дата обращения 09.06.25).
8. Тенденции развития гидроакустических средств в составе комплексов автономных и телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов. [Электронный ресурс] URL: http://www. studifiles.net. (дата обращения 09.06.25).
9. Использование звуковизоров при обследовании ГТС. Использование звуковизоров при обследовании гидротехнических сооружений (ГТС). [Электронный ресурс] URL: http://www. wisp. (дата обращения 09.06.25).
10. Тетис Про, ОАО представляет гидролокаторы высокого разрешения – звуковизоры. [Электронный ресурс] URL: http:// www.korabel.ru. (дата обращения 09.06.25).
11. Ю. Берков. Проблемы подводного звуковидения. [Электронный ресурс] URL: http://www. vk.com. (дата обращения 09.06.25).
12. Гидролокаторы и звуковизоры. Каталог компании ООО Тетис ПРО, РФ, М., 2023, 240 с.
13. Подводный активно-импульсный телевизионный прибор ночного видения Lynx Lsv-w. Проспект компании ТУРН. РФ, М.: 2024.

УДК 551.501

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КЛАССИФИКАЦИИ УЧАСТКОВ ЛЕСНЫХ МАССИВОВ ПО СПЕКТРАМ ОТРАЖЕНИЯ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ДИАПАЗОНОВ В ВИДИМОЙ И БЛИЖНЕЙ ИК ОБЛАСТИ

Городничев В.А., Белов М.Л., Белов А.М., Назаров В.В.
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Аннотация: Статья посвящена исследованиям эффективности классификации участков лесных массивов по спектрам отражения для различных спектральных диапазонов в видимой и ближней ИК области. Исходной информацией для анализа являются данные измерений спектральных коэффициентов отражения разного вида участков лесных массивов в летний период - лиственных деревьев, хвойных деревьев, сухостоя, болот и гарей. Для классификации использовался метод опорных векторов. Показано, что результаты классификации участков лесных массивов являются наилучшие для спектрального диапазона 0,4-2,4 мкм. Однако, практически такие же результаты показывает моделирование и для спектрального диапазона 1-2,4 мкм. При этом, для обоих спектральных диапазонов аддитивный шум очень мало влияет на результаты классификации. Результаты классификации участков лесных массивов для спектрального диапазона 0,4- 1 мкм существенно хуже. Также для этого спектрального диапазона уже заметно влияние на результаты классификации шумов измерения. При относительном среднеквадратическом значении шума измерения 10% метод опорных векторов позволяет получить оценки вероятностей классификации болот, гарей, лиственных деревьев, сухостоя и хвойных деревьев: для спектрального диапазона 0,4-1 мкм P_d ~ 0,5-1 при P_a ~ 0-0,1; для спектрального диапазона 1-2,4 мкм P_d ~ 0,88-1 при P_a ~ 0-0,03; для спектрального диапазона 0,4-2,4 мкм P_d ~ 0,89-1 при P_a ~ 0-0,03.

Ключевые слова: оптический метод, мониторинг лесной растительности, классификация, ближний ИК диапазон.

STUDY OF THE EFFECTIVENESS OF CLASSIFICATION OF FOREST AREA BY REFLECTION SPECTRA FOR DIFFERENT SPECTRAL RANGES IN VISIBLE AND NEAR INFRARED RANGE

Gorodnichev V.A., Belov M.L., Belov A.M., Nazarov V.V.
Bauman Moscow State Technical University, Moscow

Abstract: The article is devoted to studies of the effectiveness of classification of forest area by reflection spectrum for different spectral ranges in visible and near IR region. The source information for analysis is data from measurements of spectral indices reflecting different types of forest area in summer - deciduous trees, coniferous trees, deadwood, swamps and burnt areas. The method of supporting vectors was used for classification. It is shown that the results of classification of forest areas are best for spectral range 0,4-2,4 μm. However, almost the same results are shown by modelling for the spectral-irradiance range 1-2,4 μm. However, for both spectral ranges, additive noise has little effect on classification results. The results of forest area classification for spectral range 0,4-1 μm are significantly worse. Also for this spectral range, the effect on the results of the class classification of the measurements noise is already noticeable. With a relative mean square value of the noise measured at 10%, the method of supporting vectors gives estimates of the probabilities of classification of deciduous trees, coniferous trees, deadwood, swamps and burnt areas: for the spectral range 0,4-1 μm P_d ~ 0,5-1 at P_a ~ 0-0,1; for spectral range 1-2,4 μm P_d ~ 0,88-1 at P_a ~ 0-0,03; for spectral range 0,4-2,4 μm P_d ~ 0,89-1 at P_a ~ 0-0,03.

Keywords: optical method, monitoring forest vegetation, classification, near infrared range.

Введение

В настоящее время актуальным направлением дистанционного зондирования окружающей среды являются различные задачи мониторинга растительного покрова – оценка состояния лесных массивов, оценка продуктивности сельскохозяйственных культур, оценка влагосодержания почв и состояния экосистем, картирование лесных массивов, районов заболачивания, опустынивания, засухи др. [1-9].

Особенно актуальным представляется мониторинг таких сложных экологических систем как лесные массивы, которые характеризуется большим разнообразием участков, образующих эти массивы.

Отметим, что лесные массивы выполняют множество экологических (климатообразующих, водоохранных и т.д.), экономических, социальных и других важнейших функций [10,11].

На сегодняшний день в РФ основным методом контроля состояния леса является обход лесных участков. Однако, этот метод имеет большую трудоемкость. Наиболее перспективными методами мониторинга состояния лесных массивов являются дистанционные оптические аэрокосмические методы в видимом и ближнем инфракрасном спектральных диапазонах.

Использование мультиспектральных и гиперспектральных данных о лесных массивах в видимом и ближнем инфракрасном спектральных диапазонах дает возможность дистанционно решать многие задачи мониторинга лесных территорий (картирование лесных территорий, возрастной состав лесов, болезни, пожары, оценка запасов древесины и т.п.) (см., например, [12-19]).

В статье на основе данных измерений отражательных характеристик участков лесных массивов приведены результаты исследования эффективности классификации участков лесных массивов по спектрам отражения для различных спектральных диапазонов в видимой и ближней ИК области.

Исходные данные для классификации участков лесных массивов

Исходной информацией для анализа являются данные измерений спектральных коэффициентов отражения разного вида участков лесных массивов в спектральном диапазоне 0,4-2,4 мкм.

Примеры спектральных зависимостей коэффициентов отражения хвои (рисунок 1*а*, где 1- ель, 2 – сосна) и листьев (рисунок 1*б*, где 1- береза, 2 – осина, 3 - дуб, 4 - клен, 5 - липа) разных пород деревьев в спектральном диапазоне 0,4 - 1 мкм показаны на рисунке 1.

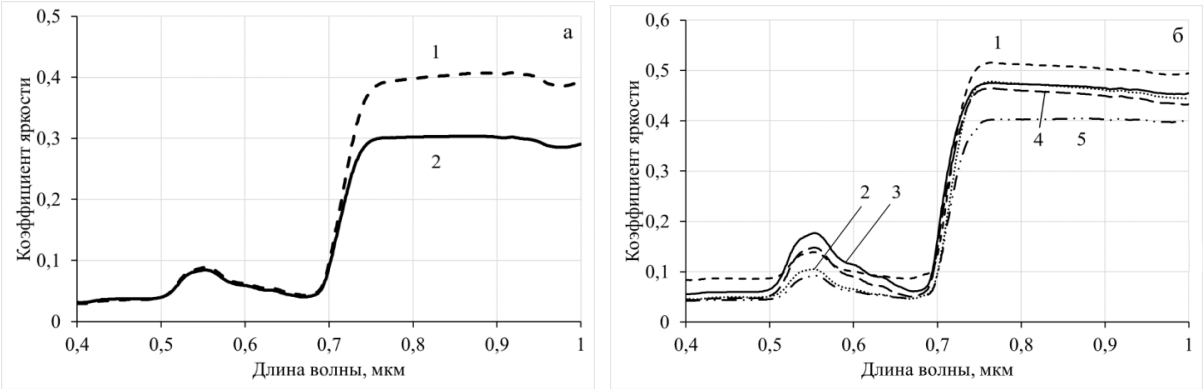


Рисунок 1 – Спектральные коэффициенты отражения: *а* – хвои, *б* – листьев разных пород деревьев в спектральном диапазоне 0,4 - 1 мкм

Примеры спектральных зависимостей коэффициентов отражения хвои (рисунок 2*а*, где 1- ель, 2 – сосна) и листьев (рисунок 2*б*, где 1- береза, 2 – осина, 3 - дуб, 4 - клен, 5 - липа) разных пород деревьев в спектральном диапазоне 1 – 2,4 мкм показаны на рисунке 2.

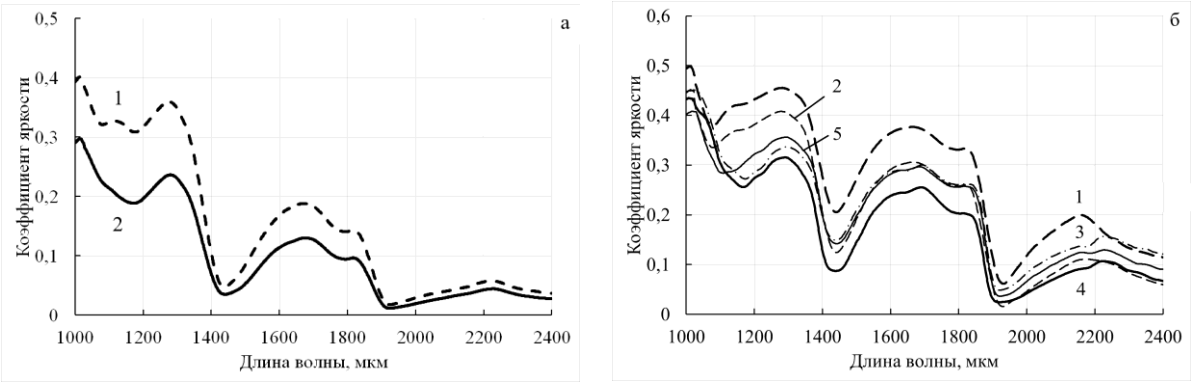


Рисунок 2 – Спектральные коэффициенты отражения: *а* – хвои, *б* – листьев разных пород деревьев в спектральном диапазоне 1 – 2,4 мкм

Задача классификации участков лесных массивов решалась на основе данных о спектральных коэффициентах отражения в летний период лиственных деревьев, хвойных деревьев, сухостоя, болот и гарей в спектральном диапазоне 0,4-2,4 мкм.

В качестве исходных данных для классификации были взяты спектры отражения [20-24]:

- лиственных деревьев разных пород (осина, лох узколистый, орех, клен, береза, дуб, бук – 24 спектра);
- хвойных деревьев разных пород (сосна, ель, можжевельник, кедр, пихта – 27 спектров);

- сухого леса (сухие листья; сухие иголки хвойных деревьев; опавшие листья; сухой лишайник; сухая кора лиственных и хвойных деревьев – 32 спектр);
- болот (с разным процентом покрытия растительностью – 41 спектр);
- разных участков гарей (23 спектра).

В работе авторов [25] для классификации участков лесных массивов в спектральном диапазоне 0,4-2,4 мкм использовались следующие методы машинного обучения (см., например, [26-29]): k-ближайших соседей (k Nearest Neighbors); случайный лес (Random Forest); сильно рандомизированные деревья (Extremely Randomized Trees); градиентный бустинг (Gradient Boosting); метод опорных векторов (Support Vector Machine).

Результаты [25] показывают хорошие результаты классификации участков лесных массивов в спектральном диапазоне 0,4-2,4 мкм. При этом, наилучшие результаты классификации получаются при использовании метода опорных векторов (Support Vector Machine).

Заметим, что и результаты работ других авторов (см., например, [30-32]) показывают хорошие результаты классификации участков лесных массивов в спектральном диапазоне 0,4-2,4 мкм.

При измерениях спектров отражения участков лесных массивов в спектральном диапазоне 0,4-2,4 мкм обычно используется два спектрометра: один в диапазоне ~ 0,4-1 мкм, второй – в диапазоне ~ 1-2,4 мкм. Поэтому, представляет практический интерес использование для мониторинга лесных массивов только одного спектрометра (в диапазоне ~ 0,4-1 мкм или в диапазоне ~ 1-2,4 мкм). Каждый из этих вариантов имеет свои достоинства.

Достоинства спектрального диапазона 0,4-1 мкм: более высокое спектральное и пространственное разрешение аппаратуры, отсутствие необходимости охлаждения приемников, более скромные массо-габаритные характеристики (и, соответственно, использование более легких беспилотных летательных аппаратов).

Достоинства спектрального диапазона 1-2,4 мкм: спектры отражения разных видов лесной растительности существенно различаются. Это дает возможность потенциально с большей надежностью проводить в этом диапазоне классификацию разных видов лесной растительности [33].

Поэтому, представляет интерес проведение количественной оценки эффективности классификации участков лесных массивов по спектрам отражения для различных спектральных диапазонов в видимой и ближней ИК области.

Как и в работе [25] для обучения использовалась 66% спектров отражения каждого типа участков лесных массивов.

Остальные (34%) спектров отражения каждого типа участков лесных массивов использовались для тестирования работы метода классификации (получения количественной оценки эффективности классификации). Для этих спектров, используемых для тестирования, добавлялся аддитивный случайный шум, имитирующий шум приемного канала. Считалось, что шум распределен по нормальному закону с нулевым средним значением и относительным (по отношению к значению спектрального отсчета) среднеквадратическим отклонением δ=1–10 %.

Для классификации в работе использовался только метод опорных векторов (который показал наилучшие результаты классификации в [25]).

Для количественной оценки эффективности классификации участков лесных массивов по спектрам отражения проводилась оценка вероятности правильной классификации P_d - отношение числа анализируемых спектров отражения, отнесенных к данному участку, к общему числу анализируемых спектров (когда все анализируемые спектры отражения принадлежат данному участку) и оценка вероятности неправильной классификации P_a - отношение числа анализируемых спектров, отнесенных к данному участку, к общему числу анализируемых спектров (когда все анализируемые спектры отражения не принадлежат данному участку). При этом, указанные ниже в таблицах 1,2 оценки вероятности неправильной классификации являются средними по всем участкам лесного массива (кроме данного участка).

Результаты классификации участков лесных массивов

Результаты статистического моделирования (моделирование проводилось по 1000 реализаций шумов регистрирующей аппаратуры) оценок вероятностей правильной классификации (P_d) и неправильной классификации (P_a) участков лесных массивов – болот, гарей, лиственных деревьев, сухостоя и хвойных деревьев приведены ниже в таблицах 1-4 при использовании метода опорных векторов.

В таблице 1 показаны результаты статистического моделирования в среднем для всех типов участков лесных массивов для спектральных диапазонов: 0,4-1 мкм, 1-2,4 мкм и 0,4-2,4 мкм.

Таблица 1 – Средние (по всем типам участков) результаты классификации

Спектральный диапазон	δ=1 %		δ=3 %		δ=5 %		δ=10 %	
	P_d	P_a	P_d	P_a	P_d	P_a	P_d	P_a
0,4- 1 мкм	0,87	0,03	0,87	0,03	0,86	0,04	0,85	0,04
1- 2,4 мкм	0,96	<0,01	0,96	<0,01	0,96	<0,01	0,96	0,01
0,4- 2,4 мкм	0,96	<0,01	0,96	<0,01	0,96	<0,01	0,96	<0,01

В таблицах 2-4 показаны результаты статистического моделирования для каждого типа участков лесных массивов для спектральных диапазонов: 0,4-1 мкм (таблица 2), 1-2,4 мкм (таблица 3) и 0,4-2,4 мкм (таблица 4, она повторяет результаты работы [25] и приведена для сравнения с таблицами 2 и 3).

Таблица 2 – Результаты классификации для спектрального диапазона 0,4-1 мкм

Участок лесного массива	δ=1 %		δ=3 %		δ=5 %		δ=10 %	
	P_d	P_a	P_d	P_a	P_d	P_a	P_d	P_a
болота	>0,99	0,09	>0,99	0,09	0,99	0,1	0,98	0,1
гари	>0,99	0,02	>0,99	0,02	>0,99	0,02	>0,99	0,02
лиственные зеленые деревья	0,78	<0,01	0,78	<0,01	0,78	<0,01	0,78	<0,01
сухие деревья	0,59	<0,01	0,55	<0,01	0,53	<0,01	0,50	<0,01
хвойные зеленые деревья	>0,99	0,05	>0,99	0,05	>0,99	0,05	>0,99	0,06

Таблица 3 – Результаты классификации для спектрального диапазона 1-2,4 мкм

Участок лесного массива	δ=1 %		δ=3 %		δ=5 %		δ=10 %	
	P_d	P_a	P_d	P_a	P_d	P_a	P_d	P_a
болота	0,93	0,03	0,93	0,03	0,93	0,03	0,93	0,03
гари	>0,99	<0,01	>0,99	<0,01	>0,99	<0,01	>0,99	<0,01
лиственные зеленые деревья	0,89	<0,01	0,89	<0,01	0,89	<0,01	0,88	<0,01
сухие деревья	>0,99	0,02	>0,99	0,02	>0,99	0,02	0,98	0,02
хвойные зеленые деревья	>0,99	<0,01	>0,99	<0,01	>0,99	<0,01	>0,99	<0,01

Таблица 4 – Результаты классификации для спектрального диапазона 0,4-2,4 мкм

Участок лесного массива	δ=1 %		δ=3 %		δ=5 %		δ=10 %	
	P_d	P_a	P_d	P_a	P_d	P_a	P_d	P_a
болота	0,93	0,03	0,93	0,03	0,93	0,03	0,93	0,03
гари	>0,99	<0,01	>0,99	<0,01	>0,99	<0,01	>0,99	<0,01
лиственные зеленые деревья	0,89	<0,01	0,89	<0,01	0,89	<0,01	0,89	<0,01
сухие деревья	>0,99	0,02	>0,99	0,02	>0,99	0,02	>0,99	0,02
хвойные зеленые деревья	>0,99	<0,01	>0,99	<0,01	>0,99	<0,01	>0,99	<0,01

Результаты, приведенные в таблицах 1-4 показывают, что результаты классификации участков лесных массивов являются наилучшие для спектрального диапазона 0,4-2,4 мкм. Однако, практически такие же результаты показывает моделирование и для спектрального диапазона 1-2,4 мкм. При этом, для обоих спектральных диапазонов аддитивный шум очень мало влияет на результаты классификации.

Результаты классификации участков лесных массивов для спектрального диапазона 0,4-1 мкм существенно хуже. Также для этого спектрального диапазона уже заметно влияние на результаты классификации шумов измерения.

При относительном среднеквадратическом значении шума измерения 10% метод опорных векторов позволяет получить оценки вероятностей классификации болот, гарей, лиственных деревьев, сухостоя и хвойных деревьев: для спектрального диапазона 0,4-1 мкм $P_d \sim$ 0,5-1 при $P_a \sim$ 0-0,1; для спектрального диапазона 1-2,4 мкм $P_d \sim$ 0,88-1 при $P_a \sim$ 0-0,03; для спектрального диапазона 0,4-2,4 мкм $P_d \sim$ 0,89-1 при $P_a \sim$ 0-0,03.

Выводы

Проведено исследование эффективности классификации участков лесных массивов по спектрам отражения для различных спектральных диапазонов в видимой и ближней ИК области. Исходной информацией для анализа являются данные измерений спектральных коэффициентов отражения разного вида участков лесных массивов в

летний период – лиственных деревьев, хвойных деревьев, сухостоя, болот и гарей. Для классификации использовался метод опорных векторов. Показано, что результаты классификации участков лесных массивов являются наилучшие для спектрального диапазона 0,4-2,4 мкм. Однако, практически такие же результаты показывает моделирование и для спектрального диапазона 1-2,4 мкм. При этом, для обоих спектральных диапазонов аддитивный шум очень мало влияет на результаты классификации. Результаты классификации участков лесных массивов наилучшие для спектрального диапазона 0,4-1 мкм существенно хуже. Также для этого спектрального диапазона уже заметно влияние на результаты классификации шумов измерения. При относительном среднеквадратическом значении шума измерения 10% метод опорных векторов позволяет получить оценки вероятностей классификации болот, гарей, лиственных деревьев, сухостоя и хвойных деревьев: для спектрального диапазона 0,4 -1 мкм $P_d \sim$ 0,5-1 при $P_a \sim$ 0-0,1; для спектрального диапазона 1-2,4 мкм $P_d \sim$ 0,88-1 при $P_a \sim$ 0-0,03; для спектрального диапазона 0,4-2,4 мкм $P_d \sim$ 0,89-1 при $P_a \sim$ 0-0,03.

Литература

1. Белов М.Л., Городничев В.А., Колючкин В.Я., Одиноков С.Б. Оптико-электронные системы мониторинга природной среды. М.: Из-во МГТУ, 2014, 76 с.
2. Токарева О.С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010.148 с.
3. Вегетационные индексы. Основы, формулы, практическое использование. Режим доступа: http://www.mapexpert.com.ua/index_ru.php?id=20&table=news (дата обращения 05.02.2016).
4. Zhang Y. Leaf chlorophyll content retrieval from airborne hyperspectral remote sensing imagery / Y. Zhang, J.M. Chen, J.R. Miller, T.L. Noland // Remote Sensing of Environment. - 2008. № 112. P. 3234-3247.
5. Черепанов А.С., Дружинина Е.Г. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы. Режим доступа: http://sovzond.ru/press-center/geomatics/2009-03/ (дата обращения 10.12.2016).
6. Кабонен А.В., Грязькин А.В., Гаврилова О.И. Оценка состояния лесных культур с использованием беспилотного летательного аппарата // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 3. С. 57–66. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-57-66

7. Батырев Ю.П., Поярков Н.Г., Чумаченко С.И., Беляев М.Ю., Сармин Э.Э., Есаков А.М., Черемисин М.В. Особенности проведения космического эксперимента «Дубрава» с борта Российского сегмента МКС // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 1. С. 135–142. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-1-135-142

8. Зотов С.А., Дмитриев Е.В., Шибанов С.Ю. Оценка информационных возможностей гиперспектрального космического комплекса НПО «Лептон» и МФТИ в задаче мониторинга лесных территорий России // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 3. С. 26–32. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-3-26-32

9. Покоева М.В., Ярославцев А.М. Экологические исследования смешанных насаждений методами дистанционного зондирования // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 3. С. 33–38. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-3-33-38.

10. Combating climate change – a role for UK forests. An assessment of the potential of the UK's trees and woodlands to mitigate and adapt to climate change / Ed. Read D.J., Freer-Smith P.H., Morison J.I.L., Hanley N., West C.C., Snowdon P. 2009. The Stationery Office, Edinburgh. 222 p.

11. Boreal Forests in the Face of Climate Change / Ed. Girona M.M.,·Morin H.,·Gauthier S., Bergeron Y. 2023. Springer. Geneva, Switzerland. 859 p.

12. Dmitriev E.V., Kozoderov V.V., Kondranin T.V., Sokolov A.A. Regional monitoring of forest vegetation using airborne hyperspectral remote sensing data. // Proc. of SPIE. 2014. V. 9263. P. 926330-1 - 926330-10.

13. Hycza T., Stereńczak K., Bałazy R. Potential use of hyperspectral data to classify forest tree species. // New Zealand Journal of Forestry Science. 2018. V.48 (18). P. 1- 13.

14. Kayet N. (2021). Forest Health Monitoring using Hyperspectral Remote Sensing Techniques. // Spatial Modeling in Forest Resources Management. Environmental Science and Engineering / Shit P.K., Pourghasemi H.R., Das, P., Bhunia G.S. 2021. Springer, Cham. P. 239–257.

15. Sampson P.H., Zarco-Tejada P.J., Mohammed G.H., Miller J.R., Noland T.L. Hyperspectral Remote Sensing of Forest Condition: Estimating Chlorophyll Content in Tolerant Hardwoods. // Forest Science. 2003. V.49(3). P. 381- 391.

16. Катаев М.Ю., Карташов Е.Ю. Метод компьютерного зрения для обнаружения лесных пожаров по RGB-изображениям, получаемым с помощью беспилотного моторного планёра. // Светотехника. 2021. № 2. С.15-20.

17. Белов М.Л., Белов А.М., Городничев В.А., Альков С.В. Многоспектральный оптический рефлектометрический метод мониторинга лесных ресурсов. // Светотехника. 2021. № 6. С.57-63.

18. Holzwarth S., Thonfeld F., Abdullahi S., Asam A., Da Ponte Canova E., Gessner U., Huth J., Kraus T., Leutner B., Kuenzer C. Earth Observation Based Monitoring of Forests in Germany: A Review. // Remote Sensing. 2020. V. 12. P.1-43.

19. Stoyanov A., Borisova D. Monitoring on forest ecosystems by using space-temporal analysis of different types aerospace data. // Ecological Engineering and Environment Protection. 2017. N.10. P. 31-37.

20. Meerdink S. K., Hook S. J., Abbott E.A., Roberts, D.A. ECOSTRESS Spectral Library - Version 1.0, http://speclib.jpl.nasa.gov/search-1 (2018).

21. Clark R. N., Swayze G. A., Wise R., Livo K. E., Hoefen T. M., Kokaly R. F., Sutley S. J. USGS Digital Spectral Library splib06a, U.S. Geological Survey, Data Series 231, 2007, http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06 (2007).

22. Johns Hopkins University Spectral Library [Электронный ресурс] URL: https://speclib.jpl.nasa.gov/documents/jhu_desc (дата обращения 12.08.2025).

23. Candra D.S. Deforestation detection using multitemporal satellite images // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2020. V.500, 012037. P.1-13.

24. Yin C., He B., Quan X., Yebra M., Lai G. Remote Sensing of Burn Severity Using Coupled Radiative Transfer Model: A Case Study on Chinese Qinyuan Pine Fires // Remote Sens. 2020. V.12, 3590. P. 1-19.

25. Городничев В.А., Белов М.Л., Белов А.М., Назаров В.В. Сравнительный анализ методов машинного обучения для классификации участков лесных массивов // Контенант. 2025. Т. 24. №3. С.41-50.

26. Коэльо Л. П., Ричарт В. Построение систем машинного обучения на языке Python. М.: Изд-во ДМК Пресс, 2016. 304 с

27. Рашка С., Мирджалили В. Python и машинное обучение. М.: Изд-во Диалектика-Вильямс, 2021. 848 с.

28. Шолле Ф. Глубокое обучение на Python, С.-П.: Изд-во Питер, 2023. 576 с.

29. Флах П. Машинное обучение. М.: Изд-во ДМК пресс, 2015. 400 с.

30. Dabiri Z., Lang S. Comparison of Independent Component Analysis, Principal Component Analysis, and Minimum Noise Fraction Transformation for Tree Species Classification Using APEX Hyperspectral Imagery. // ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2018. V. 7 (488). P 1-26.

31. Dadon A., Mandelmilch M., Ben-Dor E., Sheffer E. Sequential PCA-based classification of mediterranean forest plants using airborne hyperspectral remote sensing. // Remote Sensing. 2019. V.11. 2800. P. 1-19.

32. Ferreira M.P., Zortea M., Zanotta D.C., Shimabukuro Y.E., de Souza Filho C.R.. Mapping tree species in tropical seasonal semi-deciduous forests with hyperspectral and multispectral data. // Remote Sensing of Environment. 2016. 179. P. 66–78.

33. Федотов Ю.В., Иванов С.Е., Белов М.Л., Городничев В.А., Чумаченко С.И. Лабораторные измерения спектров отражения лесной растительности Европейской части России в диапазоне 1−2,4 мкм. Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 10. С. 15–24.

УДК 551.501

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧИ КЛАССИФИКАЦИИ ЛЕСНЫХ ПОРОД ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ ПО СПЕКТРАМ ОТРАЖЕНИЯ В ВИДИМОЙ И БЛИЖНЕЙ ИК ОБЛАСТИ

Иванов С.Е., Федотов Ю.В., Белов М.Л., Белов А.М., Шкарупило А.А.
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Аннотация: Статья посвящена сравнительному анализу возможностей методов машинного обучения для задачи классификации лесных пород Европейской части России. Приведены результаты экспериментальных исследований коэффициента спектральной яркости образцов листьев и хвои пород деревьев, характерных для Европейской части Российской Федерации, в спектральном диапазоне 0,4-2,4 мкм. Показано, что отличия в спектрах отражения пород деревьев в Европейской части РФ и в зарубежных базах данных проявляются в разных участках спектра и могут быть очень значительными. Проведен сравнительный анализ возможностей методов машинного обучения для задачи классификации лесных пород, характерных для Европейской части России. Результаты расчетов показывают, что наилучшие результаты дают метод опорных векторов (SVM) и свёрточная нейронная сеть (CNN). При шуме измерения 1% они позволяют для березы, дуба, клёна, липы, осины, ели и сосны обеспечить вероятность правильного обнаружения этих пород в диапазонах 0,95-1 и 0,92-1, соответственно.

Ключевые слова: гиперспектральные данные, видимый и ближний ИК диапазон, классификация пород деревьев, методы машинного обучения.

ANALYSIS OF THE POSSIBILITIES OF MACHINE LEARNING METHODS FOR THE TASK OF CLASSIFYING FOREST SPECIES IN THE EUROPEAN PART OF RUSSIA ACCORDING TO THE SPECTRA OF REFLECTION IN VISIBLE AND NEAR IR RANGE

Ivanov S.E., Fedotov Yu.V., Belov M.L., Belov A.M., Shkarupilo A.A.
Bauman Moscow State Technical University, Moscow

Abstract: The article is devoted to a comparative analysis of the possibilities of machine learning methods for the task of forest species classification in the European part of Russia. The results of experimental studies of the spectral brightness coefficient of samples of leaves and tree species typical for the European part of the Russian Federation are given in the spectral range 0,4-2,4 μm. It is shown that differences in the spectra of reflection of tree species in the European part of Russia and in foreign databases appear in different parts of the spectrum and can be very significant. Comparative analysis of the possibilities of machine learning methods for the task of tree species classification, which is typical for the European part of Russia, was carried out. The results of the calculations show that the best results are obtained by the support vector method (SVM) and a convolutional neural network (CNN). For a 1% noise measurement, these methods allow to ensure the probability of correctly classification birch, oak, maple, linden, aspen, spruce and pine in the ranges 0,95-1 and 0,92-1, respectively.

Keywords: hyperspectral data, visible and near IR range, tree species classification, machine learning methods.

Введение

На сегодняшний день одной из актуальных проблем является мониторинг состояния природной среды (см., например, [1-3]).

Среди многих задач мониторинга природной среды особое место занимает контроль состояния лесов нашей планеты. Леса выполняют много важных функций – климатообразующих, экологических, водоохранных, хозяйственных и т.п. Поэтому актуальность задачи мониторинга лесов постоянно возрастает.

Наиболее эффективными методами мониторинга лесов являются оптические аэрокосмические методы. Использование результатов гиперспектральной съемки лесов в оптическом (0,4-0,7 мкм) и ближнем инфракрасном (0,7-2,4 мкм) позволяет решать многие задачи контроля состояния лесных массивов (породный и возрастной состав лесных массивов, оценка запасов древесины, оценка потенциала депонирования углерода, мониторинг болезней лесов и др. (см., например, [4-8])).

Оценка породного состава лесных массивов важна для многих задач: планирования воспроизводства лесов, оценки запасов древесины, оценки потенциала депонирования антропогенного углерода и т.п.

Наилучшие результаты дистанционной оценки породного состава леса (дистанционной классификации пород деревьев в лесных массивах) в настоящее время получаются при использовании в аэрокосмическом мониторинге гиперспектральной аппаратуры в диапазоне 0,4-2,4 мкм (см., например, [9-12]).

Существует большое количество зарубежных публикаций, посвященных измерениям спектров отражения в диапазоне 0,4-2,4 мкм пород деревьев в разных странах (см., например, [13-19]).

Результаты исследований зарубежных авторов показывают, что задачи классификации пород деревьев в лесных массивах можно успешно решать, используя разные методы машинного обучения (см., например [10, 12, 20-22]).

Однако, результаты зарубежных работ нельзя без предварительного анализа использовать для задач лесного хозяйства Российской Федерации, так как спектры отражения одних и тех же пород деревьев в США могут существенно отличаться от спектров этих пород в Российской Федерации. Различия спектров отражения можно видеть, сравнивая примеры данных измерений (для одних и тех же пород деревьев в США и РФ) на рисунках 1 и 2 ниже в статье.

Статья посвящена экспериментальным измерениям спектров отражения пород деревьев, характерных для Европейской части Российской Федерации, в спектральном диапазоне 0,4-2,4 мкм и сравнительному анализу возможностей методов машинного обучения для задачи классификации лесных пород Европейской части России.

Результаты измерений спектров отражения пород деревьев, характерных для Европейской части Российской Федерации

Измерения спектров отражения листьев и хвои пород лесной растительности, характерной для Европейской части России, проводились на лабораторной установке.
В состав лабораторной установки входили спектрометр OPTOSKY ATP2000P [23] видимого диапазона (он обеспечивал регистрацию сигнала в спектральном диапазоне 200-1100 нм с разрешением ~ 2 нм), спектрометр OPTOSKY ATP8000 [24] ближнего инфракрасного диапазона (он обеспечивал регистрацию сигнала в диапазоне 900−2600 нм со спектральным разрешением ~ 10 нм) и источник света Zholix Instruments GLORIA-T150A. При измерениях использовался калиброванный отражательный эталон фирмы Labsphere.

На лабораторной установке измерялся коэффициент спектральной яркости образцов листьев и хвои.

Экспериментальные исследования проводились в Дмитровском районе Московской области в летний период. Интервал времени между срезанием образца листьев или хвои и проведением лабораторных измерений спектров отражения обычно не превышал 30 мин. Для одной породы древесной растительности использовались образцы с разных веток одного дерева и с разных деревьев.

В качестве образцов были использованы хвоя и листья пород деревьев, характерных для Европейской части РФ: ели, сосны, березы, дуба, клена, осины, липы. На рисунках 1,2 показаны примеры спектров отражения листьев дуба, березы, осины и хвои ели. На рисунке 1 – данные измерений для листьев дуба 1*а* и березы1*б*, на рисунке 2 – данные измерений для листьев осины 2*а* и хвои ели 2*б*. Сплошные линии на рисунках – наши данные измерений, пунктирные линии – данные измерений из базы данных [18]. Небольшие пики на наших спектрах около 1 мкм – результат сшивки спектров, полученных двумя спектрометрами.

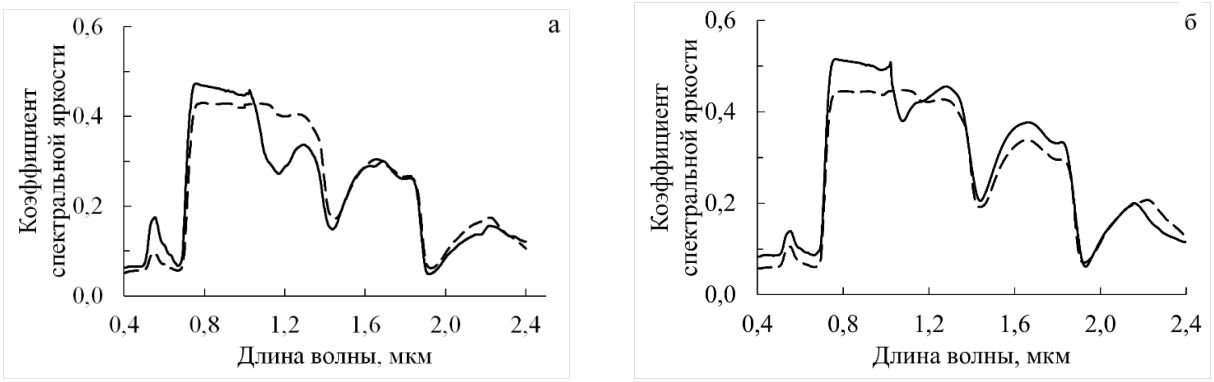


Рисунок 1 – Спектры отражения листьев: *а* – дуба черешчатого, *б* – березы повислой

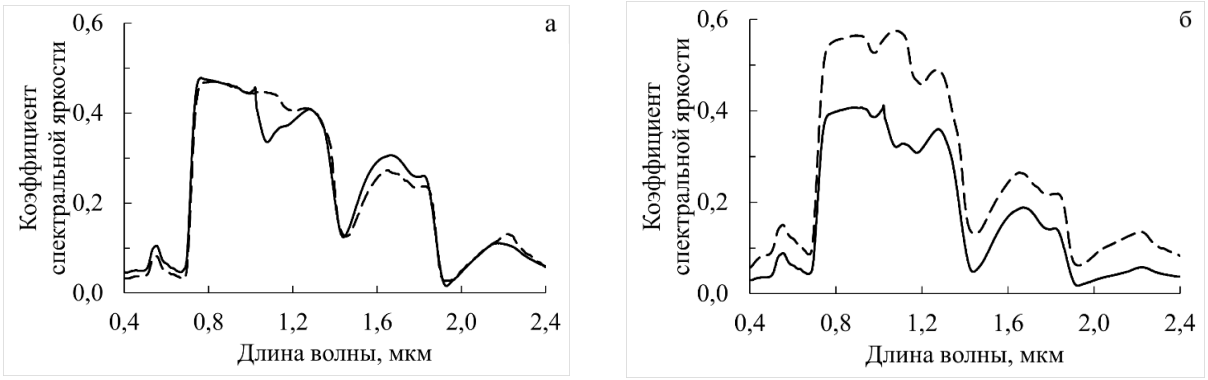


Рисунок 2 – Спектры отражения листьев: *а* – осины, *б* – ели обыкновенной

Из рисунков 1,2 видно, что отличия в спектрах отражения пород деревьев в Европейской части РФ и в зарубежных базах данных проявляются в разных участках спектра и могут быть очень значительными.

Сравнение методов машинного обучения для задачи классификации пород деревьев

Для классификации пород деревьев были использованы следующие количества измеренных спектров отражения: береза – 223, дуб – 30, клен – 75, липа – 101, осина - 70, ель – 72, сосна – 36.

Для обучения классификаторов использовалась 66% экспериментально измеренных спектров отражения каждой породы деревьев (спектры для обучения выбирались для каждой породы деревьев случайным образом).

Вторая часть (34%) измеренных спектров отражения для каждой породы (которая не вошла в обучающую выборку) использовалась для проверки работы классификаторов. Для этих спектров к каждому спектральному отсчету добавлялся аддитивный случайный шум, имитирующий шум приемной аппаратуры. Считалось, что шум распределен по гауссовскому закону с нулевым средним значением и относительным (по отношению к значению спектрального отсчета) ско δ=1-10 %.

Для количественного сравнения алгоритмов классификации пород деревьев проводилась оценка вероятности правильной классификации P_d – отношение числа анализируемых спектров отражения, отнесенных к данной породе, к общему числу анализируемых спектров (когда все анализируемые спектры отражения принадлежат данной породе) и оценка вероятности неправильной классификации P_a – отношение числа анализируемых спектров, отнесенных к данной породе, к общему числу анализируемых спектров (когда все анализируемые спектры отражения не принадлежат данной породе). При этом, указанные ниже в таблицах 1,2 оценки вероятности неправильной классификации являются средними по всем породам (кроме данной породы).

При оценке вероятностей правильной и неправильной классификации лесных пород использовалось 500 реализаций аддитивного шума для каждого спектра отражения.

Для сравнительного анализа в задаче классификации лесных пород были использованы алгоритмы (см., например, [25-29]): k-ближайших соседей (KK); дерево

решений (DT); случайный лес (RF); сильно рандомизированные деревья (ERT); адаптивный бустинг (AdaBoost); градиентный бустинг (GBoost); алгоритм HistGradientBoosting, использующий гистограммы (HGBoost); экстремальный градиентный бустинг (XGBoost); метод опорных векторов (SVM); нейронная сеть (NN); свёрточная нейронная сеть (CNN) AlexNet.

Оценки вероятности правильной и неправильной классификации (диапазон значений и средние по всем породам деревьев и по реализациям шума) для каждого из перечисленных классификаторов приведены ниже в таблице 1.

Для всех классификаторов с целью наилучшего обучения гиперпараметры (определяющие работу классификатора) подбирались с использованием функций оптимизации. Алгоритмы классификации с оптимизацией гиперпараметров были реализованы на языке Python с использованием библиотек Keras и TensorFlow для сверточной нейронной сети и библиотек Scikit-learn и Hyperopt для остальных алгоритмов.

Обучение и расчёты производились на ПК с процессором Intel Core i7-8565U частотой 1,8 ГГц и оперативной памятью 16 ГБ.

Из результатов, приведенных в таблице 1 видно, что в задаче классификации лесных пород наилучшие результаты оценки вероятности правильной классификации дают метод опорных векторов (SVM) и свёрточная нейронная сеть (CNN).

Анализ результатов классификации пород деревьев в Северной Америке, Европе, Азии и Австралии (см., например, [6,21,29-39]), с одной стороны, не противоречит этому выводу. Действительно, метод опорных векторов (SVM) и свёрточная нейронная сеть (CNN) могут давать в ряде случаев лучшие результаты классификации пород деревьев в этих регионах (или одни из лучших). Но, с другой стороны, этот анализ показывает, что выбор наилучшего классификатора (для задачи распознавания пород деревьев) сильно зависит от характера данных: состава пород деревьев; количества пород деревьев, которые надо идентифицировать; спектрального разрешения данных измерений (количества спектральных каналов); количества измеренных спектров и др.

Поэтому, результаты, приведенные в статье (по сравнительному анализу разных классификаторов в задаче распознавания пород деревьев) скорее дают информацию не о том, какой классификатор наилучший, а о том какие классификаторы дают неудовлетворительные результаты, а какие дают хорошие результаты.

Отметим также, что в таблице 1 для компактного сравнения разных классификаторов приведены только диапазон и средние (по всем породам деревьев и реализациям шума) значения оценок вероятностей правильной и неправильной классификации пород деревьев.

Таблица 1 – Оценки вероятности правильной и неправильной классификации

Классификатор	P_d, СКО шума 1%	P_a, СКО шума 1%	P_d, СКО шума 10%	P_a, СКО шума 10%
KK	0,85-1 0,93	0-0,03 0,01	0,84-1 0,92	0-0,03 0,01
DT	0,72-0,99 0,85	0-0,28 0,025	0,42-0,93 0,64	0-0,44 0,06
RF	0,86-1 0,93	0-0,14 0,01	0,65-0,95 0,84	0- 0,21 0,03
ERT	0,91-1 0,94	0-0,03 0,01	0,70-1 0,88	0-0,1 0,02
AdaBoost	0,87-1 0,94	0-0,08 0,01	0,85-0,97 0,93	0-0,1 0,01
GBoost	0,79-1 0,91	0-0,18 0,02	0,62-0,89 0,81	0-0,15 0,03
HGBoost	0,74-0,99 0,89	0-0,16 0,02	0,55-0,94 0,84	0-0,21 0,03
XGBoost	0,81-1 0,91	0-0,18 0,02	0,79-0,96 0,92	0-0,1 0,013
SVM	0,95-1 0,97	0-0,04 0,005	0,94-1 0,96	0-0,04 0,007
NN	0,92-1 0,96	0-0,013 0,005	0,87-0,98 0,94	0-0,03 0,01
CNN	0,92-1 0,96	0-0,08 0,007	0,85-1 0,95	0-0,1 0,008

На самом деле программы классификации дают более подробную информацию о вероятностях правильной и неправильной классификации пород деревьев.

В таблицах 2,3 для примера показаны сводные матрицы средних (по реализациям шума) значений оценок вероятностей правильной и неправильной

классификации пород деревьев по их спектрам отражения для метода опорных векторов (таблица 2) и сверточной нейронной сети (таблица 3) при ско шума измерения 1%.

Т а б л и ц а 2 – Сводная матрица для метода опорных векторов

псо\п	береза	дуб	ель	клен	липа	осина	сосна
береза	0,95	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
дуб	<0,01	>0,99	<0,01	0,04	<0,01	<0,01	<0,01
ель	<0,01	<0,01	0,96	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
клен	<0,01	<0,01	<0,01	0,96	<0,01	<0,01	<0,01
липа	0,04	<0,01	<0,01	<0,01	0,97	0,04	<0,01
осина	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,03	0,96	<0,01
сосна	<0,01	<0,01	0,04	<0,01	<0,01	<0,01	>0,99

Т а б л и ц а 3 – Сводная матрица для сверточной нейронной сети

псо\п	береза	дуб	ель	клен	липа	осина	сосна
береза	0,92	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
дуб	<0,01	>0,99	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
ель	<0,01	<0,01	>0,99	<0,01	<0,01	<0,01	0,03
клен	<0,01	<0,01	<0,01	0,92	0,06	0,04	<0,01
липа	0,08	<0,01	<0,01	0,04	0,94	<0,01	<0,01
осина	<0,01	<0,01	<0,01	0,04	<0,01	0,96	<0,01
сосна	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,97

В таблицах 2,3 «п» (породы перечисленные в первой строке таблицы) – действительная порода дерева для исследуемого образца, «псо» (породы перечисленные в первом столбце таблицы) – порода дерева, определенная по спектру отражения исследуемого образца. По диагонали сводной матрицы стоят полученные оценки вероятностей правильной классификации пород деревьев.

Данные, приведенные в сводной матрице оценок вероятностей правильной и неправильной классификации пород деревьев, позволяют оценить причины неправильной классификации конкретных пород деревьев в конкретном лесном массиве и (при неприемлемых значениях неправильной классификации) сформировать группы пород деревьев для приемлемой классификации таких групп пород в данном лесном массиве.

Выводы

Таким образом, в статье приведены результаты экспериментальных исследований коэффициента спектральной яркости образцов листьев и хвои пород деревьев, характерных для Европейской части Российской Федерации, в спектральном диапазоне 0,4 -2,4 мкм. Показано, что отличия в спектрах отражения пород деревьев в Европейской части РФ и в зарубежных базах данных проявляются в разных участках спектра и могут быть очень значительными. Проведен сравнительный анализ возможностей методов машинного обучения для задачи классификации лесных пород, характерных для Европейской части России. Результаты расчетов показывают, что наилучшие результаты по вероятности правильной классификации дают метод опорных векторов (SVM) и свёрточная нейронная сеть (CNN). При шуме измерения 1% они позволяют для березы, дуба, клёна, липы, осины, ели и сосны обеспечить вероятность правильного обнаружения этих пород в диапазонах 0,95 – 1 и 0,92 – 1, соответственно.

Литература

1. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2022 год / отв. ред. Г.М. Черногаева. М.: Росгидромет, 2023. 215 с.
2. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2023 год / отв. ред. Г.М. Черногаева. М.: Росгидромет, 2024. 216 с.
3. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2024 год / отв. ред. Г.М. Черногаева. М.: Росгидромет, 2025. 222 с.
4. Holzwarth S, Thonfeld F, Abdullahi S, Asam A, Da Ponte Canova E, Gessner U, Huth J, Kraus T, Leutner B, Kuenzer C. Earth Observation Based Monitoring of Forests in Germany: A Review. Remote Sensing 2020; 12: 1-43.
5. Luo Y, Huang H, Roques A. Early Monitoring of Forest Wood-Boring Pests with Remote Sensing. Annual Review of Entomology 2023; 68: 277-298.
6. Hycza T, Stereńczak K, Bałazy R. Potential use of hyperspectral data to classify forest tree species. New Zealand Journal of Forestry Science 2018; 48 (18): 1- 13.
7. Dmitriev EV, Kozoderov VV, Kondranin TV, Sokolov AA. Regional monitoring of forest vegetation using airborne hyperspectral remote sensing data. Proc. of SPIE 2014; 9263: 926330-1 - 926330-10.

8. Kumne W, Samanta S. Remote Sensing and GIS Application on Forest Resource Mapping and Monitoring in Bulolo District, Morobe Province. Journal of Geoscience and Environment Protection 2019; 7: 37-48.
9. Ferreira MP, Zortea M, Zanotta DC, Shimabukuro YE, de Souza Filho CR. Mapping tree species in tropical seasonal semi-deciduous forests with hyperspectral and multispectral data. Remote Sensing of Environment 2016; 179: 66–78.
10. Dabiri Z, Lang S. Comparison of Independent Component Analysis, Principal Component Analysis, and Minimum Noise Fraction Transformation for Tree Species Classification Using APEX Hyperspectral Imagery. ISPRS Int. J. Geo-Inf 2018; 7 (488): 1-26.
11. Wessel M, Brandmeier M, Tiede D. Evaluation of Different Machine Learning Algorithms for Scalable Classification of Tree Types and Tree Species Based on Sentinel-2 Data. Remote Sensing 2018; 10(1419): 1-21.
12. Dadon A, Mandelmilch M, Ben-Dor E, Sheffer E. Sequential PCA-based classification of mediterranean forest plants using airborne hyperspectral remote sensing. Remote Sensing 2019; 11(2800): 1-19.
13. Rautiainen M, Lukeš P, Homolová L, Hovi A, Pisek J, Mõttus M. Spectral properties of coniferous forests: A review of in situ and laboratory measurements. Remote Sensing 2018; 10(207): 1−28.
14. Hill J, Buddenbaum H, Townsend PA. Imaging spectroscopy of forest ecosystems: Perspectives for the use of space borne hyperspectral earth observation systems. Surveys in Geophysics 2019; 40: 553–588.
15. Forsstrom PR, Hovi A, Ghielmetti G, Schaepman ME, Rautiainen M. Multi-angular reflectance spectra of small single trees. Remote Sensing of Environment 2021; 255 (112302): 1−14.
16. Hejtmánek J, Stejskal J, Čepl J, Lhotáková Z, Korecký J, Krejzková A, Dvorák J, Gezan SA. Revealing the complex relationship among hyperspectral reflectance, photosynthetic pigments, and growth in norway spruce ecotypes. Front. Plant Sci 2022; 13(721064): 1−16.
17. Yel SG, Gormus ET. Exploiting hyperspectral and multispectral images in the detection of tree species: A review. Front. Remote Sens 2023; 4(1136289): 1−13.
18. USGS Digital Spectral Library 06 [Electronic resource]. Access mode: http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06. Language English (accessed 17/06/2025).

19. Johns Hopkins University Spectral Library [Electronic resource]. Access mode: https://speclib.jpl.nasa.gov/documents/jhu_desc. Language English (accessed 17/06/2025).
20. Van Aardt JAN, Wynne RH. Spectral separability among six southern tree species. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 2001; 67(12): 1367−1375. https://www.researchgate.net/publication/216859278
21. Shang X, Chisholm LA. Classification of australian native forest species using hyperspectral remote sensing and machine-learning classification algorithms. IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing 2014; 7 (6): 2481–2488.
22. Modzelewska A, Fassnacht FE, Stereńczak K. Tree species identification within an extensive forest area with diverse management regimes using airborne hyperspectral data. Int J Appl Earth Obs Geoinformation 2020; 84(101960): 1−13.
23. Popular UV-Vis vs USB2000+. Source: <https://www.optosky.net/atp2000p.html>.
24. Cooled -20℃ NIR512-2.5 Spectrometer. Source: <https://www.optosky.net/atp8000.html>.
25. Murphy KP. Machine Learning: A Probabilistic Perspective. Massachusetts Institute of Technology: Massachusetts, Cambridge, London; 2012. 997 p.
26. Prosise J. Applied Machine Learning and AI for Engineers. Beijing, Boston, Farnham, Sebastopol, Tokyo: O'Reilly Media, Inc.; 2022. 428 p.
27. Aggarwal CC. Neural networks and deep learning. Cham, Switzerland: Springer; 2018. 497 p.
28. Wu X, Kumar V,·Ross Quinlan J,·Ghosh J,·Yang Q,·Motoda H,·McLachlan GJ,·Ng A,·Liu B,·Yu PS, Zhou Z-H, Steinbach M,·Hand DJ, Steinberg D. Top 10 algorithms in data mining. Knowl Inf Syst 2008; 14(1):1–37.
29. Иванов С.Е., Федотов Ю.В., Белов М.Л., Белов А.М., Городничев В.А., Чумаченко С.И. Шкарупило А.А. Исследование спектров отражения и возможностей классификации пород лесной растительности Европейской части РФ в диапазоне 0,4–1 мкм в осенний период // Светотехника, 2025. № 2. С. 77-81.
30. Mayra J, Keski-Saari S, Kivinen S, Tanhuanpaa T, Hurskainen P, Kullberg P, Poikolainen L, Viinikka A, Tuominen S, Kumpula T, Vihervaara P. Tree species classification from airborne hyperspectral and LiDAR data using 3D convolutional neural networks. Remote Sensing of Environment 2021; 256 (112322): 1-16.
31. Hou C, Liu Z, Chen Y, Wang S, Liu A. Tree Species Classification from Airborne Hyperspectral Images Using Spatial–Spectral Network. Remote Sensing 2023; 15(5679): 1-27.

32. Shaheena L, Rasheedb B, Mazzara M. Tree species detection using hyperspectral and Lidar data: A novel self-supervised learning approach. Computer Research and Modeling 2024; 16(7): 1747–1763.
33. Wang N, Wang G. Tree species classification using machine learning algorithms with OHS-2 hyperspectral image. Scientia Forestalis 2023; 51(e3991): 1-15.
34. Fricker GA, Ventura JD, Wolf JA, North MP, Davis FW, Franklin J. A Convolutional Neural Network Classifier Identifies Tree Species in Mixed-Conifer Forest from Hyperspectral Imagery. Remote Sensing 2019; 11(2326): 1-22.
35. Misman MA, Omar H, Yaakub SY, Ayop N., Musadad AAA, Shari NHZ. UAV-Based Hyperspectral Imaging System for Tree Species Identification in Tropical Forest of Malaysia. Journal of Advanced Geospatial and Science Technology 2021; 1(1): 145-162.
36. Juola J, Hovi A, Rautiainen M. Classification of tree species based on hyperspectral reflectance images of stem bark. European journal of remote sensing 2023; 56 (1): 1-15.
37. Zhong H, Lin W, Liu H, Ma N, Liu K, Cao R, Wang T, Ren Z . Identification of tree species based on the fusion of UAV hyperspectral image and LiDAR data in a coniferous and broad-leaved mixed forest in Northeast China. Front. Plant Sci 2022; 13(964769): 1-17.
38. Wang J, Jiang Y. A Hybrid convolution neural network for the classification of tree species using hyperspectral imagery. PLoS One 2024; 19(5): 1-17.
39. Quan Y, Li M, Hao Y, Liu J, Wang B. Tree species classification in a typical natural secondary forest using UAVborne LiDAR and hyperspectral data. GIScience & Remote Sensing 2023; 60(1): 1-17.

УДК 504.064

ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРОВ ОТРАЖЕНИЯ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В БЛИЖНЕМ ИК ДИАПАЗОНЕ В УСЛОВИЯХ ЗАМОРОЗКОВ НА ПОЧВЕ

Нгуен Минь Бач, Ю.В. Федотов, Н.В. Барышников, М.Л. Белов
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Аннотация: Статья посвящена экспериментальным исследованиям спектров отражения различных антропогенных загрязнений земной поверхности в ближней ИК области спектра в условиях «заморозков» на почве. Показано, что спектральные провалы около длин волн 1,73 и 2,3 мкм (характерные для спектров отражения от почв, загрязненных нефтепродуктами) в большинстве случаев остаются в спектрах отражения после «заморозков» (хотя и могут существенно уменьшатся). При этом, во всех случаях спектры отражения почв, загрязненных нефтепродуктами в условиях «заморозков», существенно отличаются от спектров отражения незагрязненных нефтепродуктами почв после «заморозков» (в спектральных диапазонах около длин волн 1,73 и 2,3 мкм).

Ключевые слова: оптический метод, обнаружение нефтяных загрязнений, земная поверхность, заморозки на почве, ближний ИК диапазон.

STUDY OF THE REFLECTION SPECTRA OF OIL POLLUTION IN NEAR IR RANGE UNDER CONDITIONS OF FROST ON SOIL

Bach Nguyen Minh, Yu.V. Fedotov, N.V. Baryshnikov, M.L. Belov
Bauman Moscow State Technical University, Moscow

Abstract: The article is devoted to experimental studies of the spectra reflecting various anthropogenic pollution of the earth’s surface in the near-infrared range of the spectrum under conditions of "frost" on the soil. It is shown that the spectral dips around wavelengths of 1,73 and 2,3 μm (characteristic for reflection spectra from soils contaminated with petroleum products) in most cases remain in reflection spectra after "frosts" (although they may decrease substantially). In all cases, the reflection spectra of soils contaminated by petroleum products under "frost" conditions are substantially different from the reflection spectra of

uncontaminated petroleum products after "frost" (at spectral ranges around wavelengths 1,73 and 2,3 μm).

Keywords: optical method, detection of oil pollution, earth’s surface, frost on the ground, near IR range.

Введение

В настоящее время наиболее распространенными антропогенными загрязнениями в окружающей среде являются нефть и нефтепродукты (см., например, [1-5]).

Одной из основных причин такой ситуации являются большие потери нефти и нефтепродуктов, связанные с их транспортировкой. Для транспортировки нефти и нефтепродуктов можно использовать практически любые виды транспорта, но одним из наиболее распространенным (как для нефти, так и для нефтепродуктов) является трубопроводный транспорт.

К преимуществам использования трубопроводного транспорта относят прежде всего низкую стоимость транспортировки и автоматизацию процесса перекачки. Однако, большее количество нефти и нефтепродуктов теряется при их транспортировке именно по трубопроводам.

Поэтому, актуальной (особенно в малонаселенных и труднодоступных районах РФ) является задача оперативного дистанционного обнаружения разливов нефтепродуктов на земной поверхности (см., например, [6-9]).

Постановка задачи

Антропогенные загрязнения земной поверхности (в том числе нефтью и нефтепродуктами) в большинстве случаев эффективно обнаруживаются лазерным флуоресцентным методом (см., например, [10-24]).

Этот метод позволяет проводить дистанционный мониторинг с большой надежностью, независимо от времени суток и в широком диапазоне атмосферных условий. Однако, существенным недостатком этого метода (например, для установки на БПЛА) является большая масса и габариты аппаратуры.

В работе рассматривается альтернативный (лазерному флуоресцентному) пассивный оптический метод мониторинга антропогенных загрязнений (в том числе

нефтью и нефтепродуктами), основанный на измерении спектров отражения в ближней инфракрасной (ИК) области.

Физической основой пассивного оптического метода мониторинга загрязнений нефтью и нефтепродуктами в ближней ИК области является наличие спектральных провалов (вызванных поглощением углеводородами, загрязняющими поверхность) в спектрах отражения загрязненной земной поверхности.

На рисунке 1 для примера показан (по данным наших измерений) спектры отражения песка и песка, загрязненного бензином, с характерными спектральными провалами (показанными стрелками) из-за поглощения излучения на длинах около 1,73 и 2,3 мкм (диапазоны около 1,73 и 2,3 мкм являются наиболее используемыми для задачи обнаружения нефтяных загрязнений). Здесь 1 – спектр отражения песка, 2 - спектр отражения песка, загрязненного бензином.

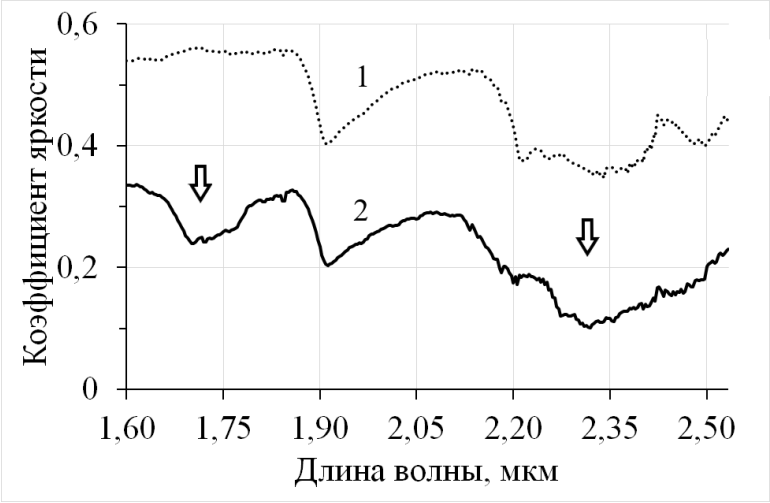


Рисунок 1 – Спектры отражения песка и песка, загрязненного бензином

На сегодняшний день проведены исследования спектров отражения разных нефтяных загрязнений почв (см., например, [15-25]).

Однако, некоторые вопросы остаются не ясными. Например, не исследованным является вопрос о влиянии состояния почвенного покрова на вид спектров отражения загрязнений нефтью и нефтепродуктами земной поверхности.

Работа посвящена экспериментальному исследованию спектров отражения нефтяных загрязнений в ближнем ИК диапазоне в условиях заморозков на почве.

Описание экспериментальной установки

Измерения спектров отражения образцов почв (с антропогенными загрязнениями и без загрязнений) проводились на лабораторной установке. Основным блоком установки является спектрометр OPTOSKY ATP8000 [26]. Спектрометр обеспечивает регистрацию сигнала в диапазоне 0,9-2,6 мкм со спектральным разрешением ~ 10 нм. В состав лабораторной установки входит источник излучения Zholix Instruments с вольфрамово-галогенной лампой GLORIA-T150A.

На лабораторной установке измерялся коэффициент спектральной яркости – отношение яркости излучения, регистрируемого от образца незагрязненной или загрязненной почвы в данном направлении (для нашей установке близком к вертикальному), к яркости излучения, регистрируемого от эталонного ламбертовского отражателя.

При проведении измерений спектров отражения образцы почвы помещались в пластиковые контейнеры. Для имитации «заморозков» на почве контейнеры с влажной почвой помещались в морозильную камеру. Для создания умеренно влажной почвы в контейнер наливалось около 15 мл воды (так, чтобы вода все еще впитывалась в почву). Для создания сильно влажной почвы наливалось такое количество воды, чтобы на поверхности почвы в контейнере стояла вода. После заморозки контейнер с образцом почвы вынимался из морозилки и на поверхность замороженной влажной почвы наливались (около 10 мл) различные вещества загрязнители.

В качестве образцов почвы использовались различные вида песка и почвы из лесных и парковых зон, а в качестве загрязнителей – различные нефтепродукты, подсолнечное масло, охлаждающая жидкость для двигателей.

Результаты экспериментальных исследований спектров отражения

На рисунках 2-6 приведены примеры спектров отражения почв после «заморозков» при загрязнением их нефтепродуктами. Во всех случаях на рисунке «*а*» показаны спектры незагрязненного (толстая сплошная линия) и загрязненного нефтепродуктами (тонкая сплошная линия) образца после «заморозков», а на рисунке «*б*» показаны спектры загрязненного нефтепродуктами (тонкая сплошная линия) образца после «заморозков» и загрязненного нефтепродуктами (толстая линия) образца в отсутствии «заморозков».

Рисунки 2-4 относятся к замороженным умеренно влажным почвам. На рисунке 2 приведены спектры отражения для песка, загрязненного дизельным топливом, на рисунке 3 – почвы, загрязненной полусинтетическим моторным маслом, на рисунке 4 – перегноя, загрязненного отработанным моторным маслом.

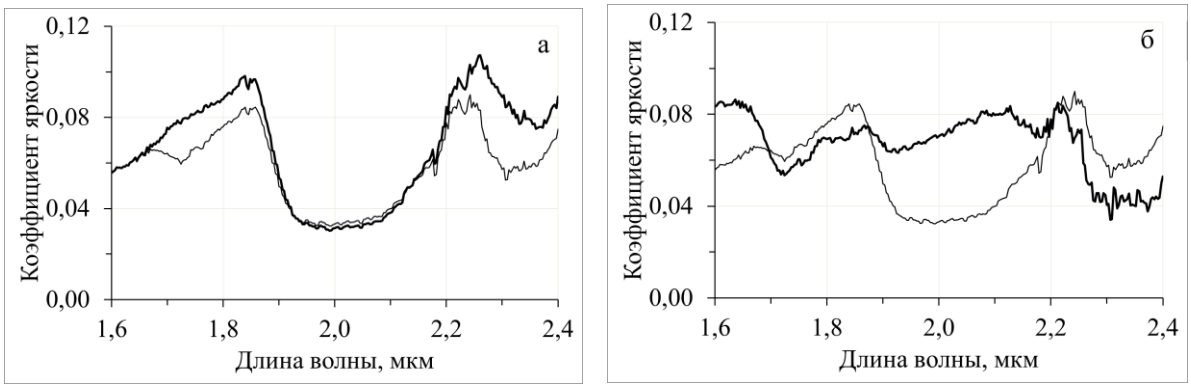


Рисунок 2 – Спектры отражения песка, загрязненного дизельным топливом: *а* – спектры незагрязненного (толстая сплошная линия) и загрязненного нефтепродуктами (тонкая сплошная линия) образца после «заморозков», *б* – спектры загрязненного нефтепродуктами (тонкая сплошная линия) образца после «заморозков» и загрязненного нефтепродуктами (толстая линия) образца в отсутствии «заморозков»

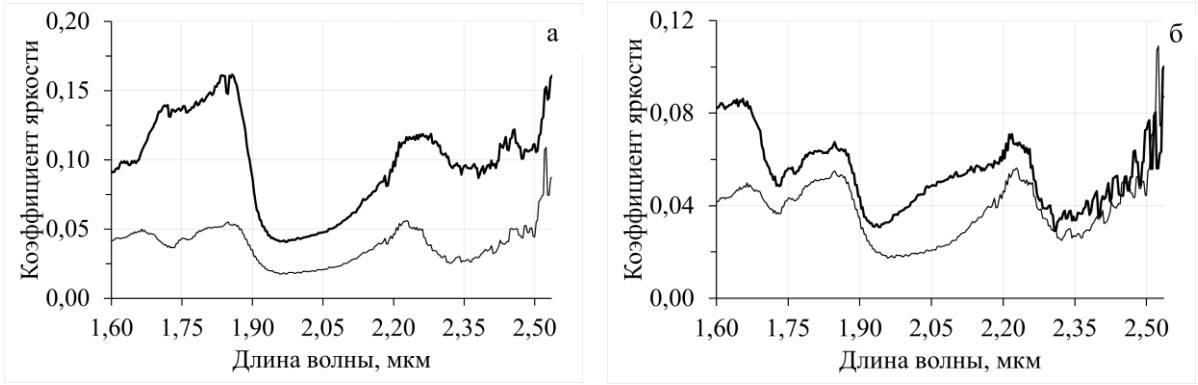


Рисунок 3 – Спектры отражения почвы, загрязненной полусинтетическим моторным маслом: *а* – спектры незагрязненного (толстая сплошная линия) и загрязненного нефтепродуктами (тонкая сплошная линия) образца после «заморозков», *б* – спектры загрязненного нефтепродуктами (тонкая сплошная линия) образца после «заморозков» и загрязненного нефтепродуктами (толстая линия) образца в отсутствии «заморозков»

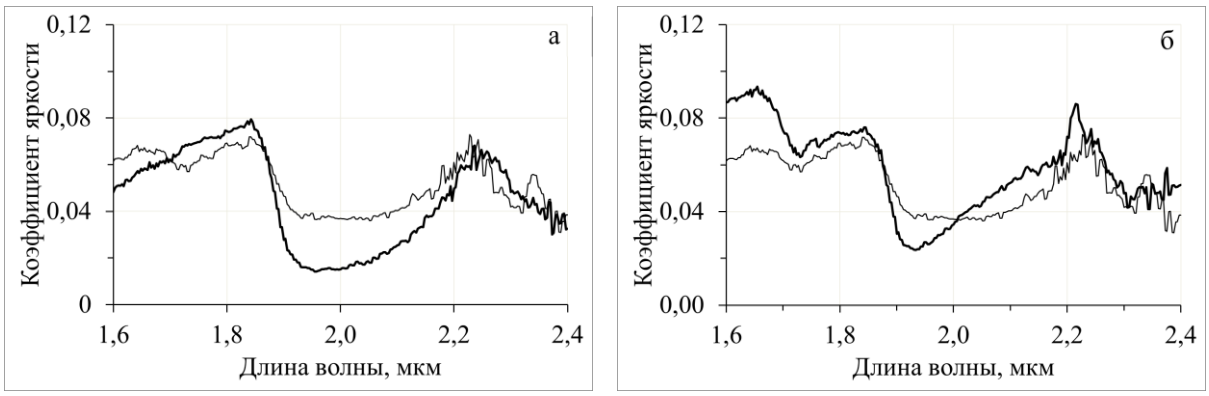


Рисунок 4 – Спектры отражения перегноя, загрязненного отработанным моторным маслом: *а* – спектры незагрязненного (толстая сплошная линия) и загрязненного нефтепродуктами (тонкая сплошная линия) образца после «заморозков», *б* – спектры загрязненного нефтепродуктами (тонкая сплошная линия) образца после «заморозков» и загрязненного нефтепродуктами (толстая линия) образца в отсутствии «заморозков»

Рисунки 5,6 относятся к замороженным сильно влажным почвам. На рисунке 5 приведены спектры отражения для почвы, загрязненной дизельным топливом, на рисунке 6 – песка, загрязненного полусинтетическим моторным маслом.

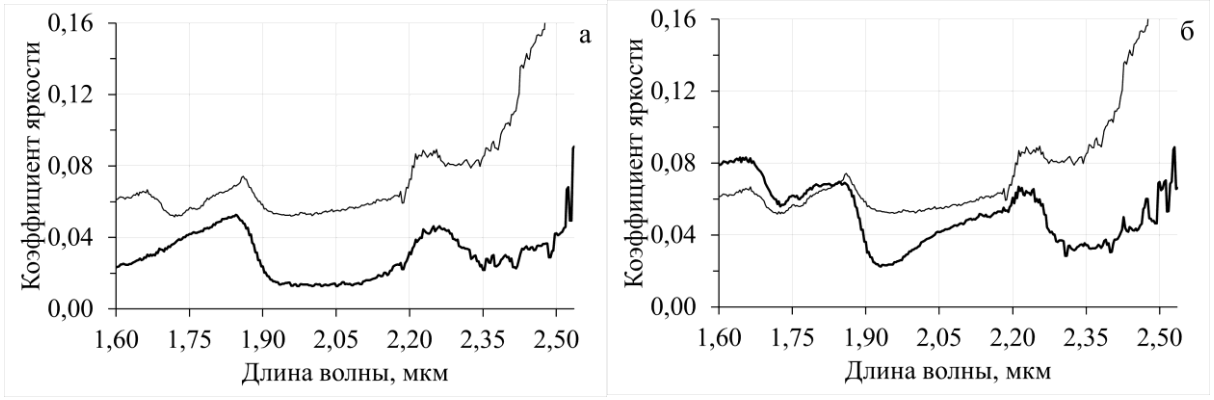


Рисунок 5 – Спектры отражения почвы, загрязненной дизельным топливом: *а* – спектры незагрязненного (толстая сплошная линия) и загрязненного нефтепродуктами (тонкая сплошная линия) образца после «заморозков», *б* – спектры загрязненного нефтепродуктами (тонкая сплошная линия) образца после «заморозков» и загрязненного нефтепродуктами (толстая линия) образца в отсутствии «заморозков»

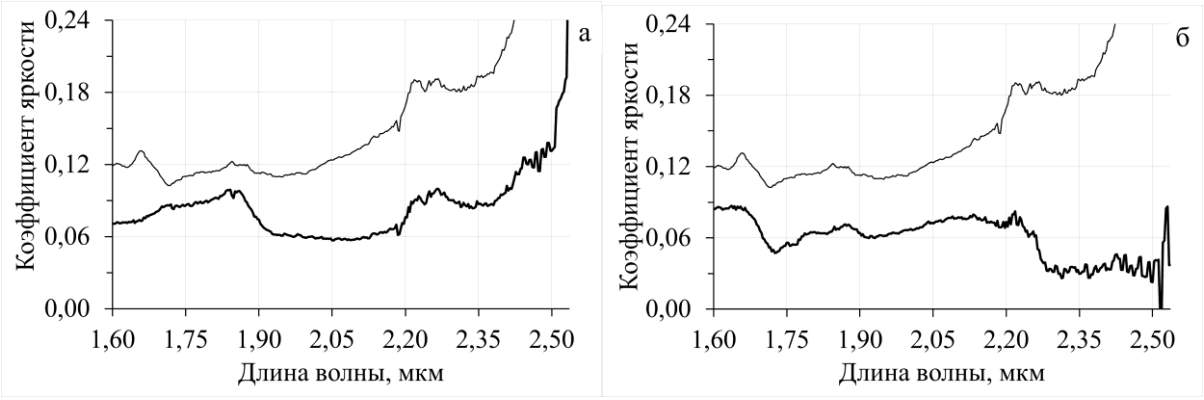


Рисунок 6 – Спектры отражения песка, загрязненного полусинтетическим моторным маслом: *а* – спектры незагрязненного (толстая сплошная линия) и загрязненного нефтепродуктами (тонкая сплошная линия) образца после «заморозков», *б* – спектры загрязненного нефтепродуктами (тонкая сплошная линия) образца после «заморозков» и загрязненного нефтепродуктами (толстая линия) образца в отсутствии «заморозков»

Анализ полученных результатов

Результаты, приведенные на рисунках 2-6, показывают, что спектральные провалы около 1,73 и 2,3 мкм (характерные для почв, загрязненных нефтепродуктами) в большинстве случаев остаются в спектрах отражения разных типов почв, загрязненных нефтепродуктами после «заморозков» (хотя и могут существенно уменьшатся).

Однако, во всех случаях спектры отражения почв, загрязненных нефтепродуктами в условиях «заморозков», сильно отличаются от спектров отражения незагрязненных нефтепродуктами почв после «заморозков» (в спектральных диапазонах около 1,73 и 2,3 мкм). Это позволяет надеяться на эффективность работы в ближнем ИК диапазоне гиперспектрального метода обнаружения нефтяных загрязнений в широком диапазоне состояния почв.

Выводы

Таким образом, проведены экспериментальные исследования спектров отражения различных антропогенных загрязнений земной поверхности в ближней ИК области спектра в условиях «заморозков» на почве. Показано, что спектральные провалы около длин волн 1,73 и 2,3 мкм (характерные для спектров отражения от почв, загрязненных нефтепродуктами) в большинстве случаев остаются в спектрах

отражения после «заморозков» (хотя и могут существенно уменьшатся). При этом, во всех случаях спектры отражения почв, загрязненных нефтепродуктами в условиях «заморозков», существенно отличаются от спектров отражения незагрязненных нефтепродуктами почв после «заморозков» (в спектральных диапазонах около длин волн 1,73 и 2,3 мкм).

Литература

1. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2024 год / отв. ред. Г.М. Черногаева. М.: Росгидромет, 2025. 222 с
2. Huettel M. Oil pollution of beaches // Current Opinion in Chemical Engineering. 2022. V. 36, 100803. P. 1-10. DOI:10.1016/j.coche.2022.100803.
3. Komene G.L., Remi C.O. Oil pollution crisis and relationship marketing approach of oil firms in Niger delta // British Journal of Management and Marketing Studies. 2022. V.5, N 1. P. 39-78. DOI:10.52589/BJMMS-2HWKHPGW.
4. Al-Battbootti M.J.H., Goga N., Marin I. Detection and Analysis of Oil Spill using Image Processing // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2022. V. 13, N. 4. P. 381-387. DOI:10.14569/IJACSA.2022.0130445.
5. Ismailova N.M., Nadjafova S.I. Experience in Assessing Environmental Risks of Main Oil Pipelines in Azerbaijan through the Prism of Soil Biogeoresistance to Crude Oil Pollution // Moscow University Soil Science Bulletin. 2022. V. 77. N. 3. P. 196–202. DOI:10.3103/S014768742203005X.
6. Komene G.L., Remi C.O. Oil pollution crisis and relationship marketing approach of oil firms in Niger delta. // British Journal of Management and Marketing Studies. 2022. V.5. N 1. P. 39-78.
7. Huettel M. Oil pollution of beaches. // Current Opinion in Chemical Engineering. 2022. V. 36. 100803. P. 1-10.
8. Adegboye M.A., Fung W.-K., Karnik A. Recent advances in pipeline monitoring and oil leakage detection technologies: Principles and approaches. // Sensors. 2019. V. 19. № 2548. P. 1–36.
9. Arellano P., Tansey K., Balzter H., Boyd D.S. Detecting the effects of hydrocarbon pollution in the Amazon forest using hyperspectral satellite images. // Environmental Pollution. 2015. 205. P. 225-239

10 Babichenko S., Dudelzak A., Poryvkina A. Laser remote sensing of coastal and terrestrial pollution by fls-lidar // EARSeL eProceedings. 2004. V.3, N 1. P. 1–7.

11. Федотов Ю. В., Матросова О. А., Белов М. Л., Городничев В. А. Метод обнаружения нефтяных загрязнений на земной поверхности, основанный на регистрации флуоресцентного излучения в трех узких спектральных диапазонах // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 3. С. 208-212.

12. Федотов Ю.В., Белов М.Л., Городничев В.А. Дистанционный лазерный флуоресцентный метод обнаружения утечек нефти на длине волны возбуждения 266 нм // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 5. С. 54–61. http://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-05-54-61

13. Alaruri S.D. Multiwavelength laser induced fluorescence (LIF) LIDAR system for remote detection and identification of oil spills // Optik - International Journal for Light and Electron Optics. 2019. V.181. P.239–245. DOI:10.1016/j.ijleo.2018.12.073.

14. Pashayev A., Tagiyev B., Allahverdiyev K., Musayev A., Sadikhov I. Lidar for remote sensing of contaminations on water and earth surface taking place during oil-gas production // Proc. SPIE. 2015. V. 9810. P. 981018-1–981018-7. DOI:10.1117/12.2225219.

15. Achard V., Foucher P.Y., Dubucq D. Hydrocarbon Pollution Detection and Mapping Based on the Combination of Various Hyperspectral Imaging Processing Tools. // Remote Sensing. 2021. V.13 (5). 1020. P. 1-28.

16. Brum J., Schlegel C., Chappell C.,·Burke M.,·Krekeler M.P.S. Refective spectra of gasoline, diesel, and jet fuel A on sand substrates under ambient and cold conditions: Implications for detection using hyperspectral remote sensing and development of age estimation models. // Environmental Earth Sciences. 2020. V.79. 463. P.1-14.

17. Pelta R., Ben-Dor E. An Exploratory Study on the Effect of Petroleum Hydrocarbon on Soils Using Hyperspectral Longwave Infrared Imagery. // Remote Sensing. 2019. V.11(569). P. 1-15.

18. Del'Papa R., Scafutto M., de Souza Filho C.R., de Oliveira. W.J. Hyperspectral remote sensing detection of petroleum hydrocarbons in mixtures with mineral substrates: Implications for onshore exploration and monitoring. // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2017. V.128. P.146–157.

19. Keskin G., Teutsch C.D., Lenz A., Middelmann W. Concept of an advanced hyperspectral remote sensing system for pipeline monitoring. // Proc. SPIE. 2015. V.9644. P. 96440H-1 - 96440H-9.

20. Allen C.S., Satterwhite M.B. Reflectance spectra of three liquid hydrocarbons on a common sand type. // Proc. SPIE. 2006. V. 6233. P. 62331M-1 - 62331M-12.

21. Allen C.S., Krekeler M.P.S. Reflectance spectra of crude oils and refined petroleum products on a variety of common substrates. // Proc. SPIE. 2010. V.7687. P. 76870L-1 - 76870L-13.

22. Masoumi H., Safavi S.M., Khani Z. Identification and Classification of Plastic Resins using Near Infrared Reflectance Spectroscopy. // International Journal of Mechanical and Industrial Engineering. 2012. V.6. P. 213-220.

23. Bonifazi G., Fiore L., Gasbarrone R., Hennebert P., Serranti S. Detection of Brominated Plastics from E-Waste by Short-Wave. // Infrared Spectroscopy. 2021, V. 6. 54. P.1-21.

24. Kühn F., Oppermann K., Hörig B. Hydrocarbon Index – an algorithm for hyperspectral detection of hydrocarbons. // International Journal of Remote Sensing. 2004. 25(12). P. 2467-2473.

25. Hörig B., Kühn F. HyMap hyperspectral remote sensing to detect hydrocarbons. // Int. J. remote sensing. 2001, V. 22. N. 8. P. 1413–1422.

26. Cooled -20℃ NIR512-2.5 Spectrometer [Electronic resource]. Access mode: URL: https://www.optosky.net/atp8000.html. Language English (accessed 17/09/2025).

УДК 621.373.826

ГЕНЕРАЦИЯ СОЛИТОННЫХ МОЛЕКУЛ УПРАВЛЯЕМОГО ПОРЯДКА С НИЗКИМ УРОВНЕМ ШУМА В УСЛОВИЯХ КОМПЕНСАЦИИ ДИСПЕРСИИ ВТОРОГО И ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА В ПОЛНОСТЬЮ ВОЛОКОННОМ ЭРБИЕВОМ ЛАЗЕРЕ

Плитарак М.С.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва

E-mail: plitarak@bmstu.ru

Аннотация: Экспериментально исследована генерация солитонных молекул (СМ) высокого порядка в эрбиевом волоконном лазере. Управление мощностью накачки обеспечило перестраиваемую генерацию от 4 до 14 стабильных импульсов с длительностью ≈500 фс, интервалом 2,59 пс, средней мощностью 48 мВт, низким уровнем шума (0.08%) и высокой долговременной стабильностью (девиация Аллана $1{,}98 \cdot 10^{-9}$), что говорит о возможности создания надежного источника генерации контролируемых связанных состояний для потенциального применения в квантовых вычислениях.

Ключевые слова: солитонные молекулы; эрбиевый волоконный лазер; нелинейная эволюция поляризации; синхронизация мод; квантовые вычисления.

CONTROLLED-ORDER SOLITON MOLECULES WITH LOW NOISE IN AN ALL-FIBER ERBIUM LASER USING SECOND- AND THIRD-ORDER DISPERSION COM-PENSATION

Plitarak M.S.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow

E-mail: plitarak@bmstu.ru

Abstract: The generation of high-order soliton molecules in an erbium-doped fiber laser has been experimentally studied. By adjusting the pump power, tunable generation of stable pulses ranging from 4 to 14 was achieved, with a pulse duration of ≈500 fs, separation of 2,59 ps, average power of 48 mW, low noise level (0.08%), and high long-term stability (Allan

deviation of $1{,}98 \cdot 10^{-9}$). This demonstrates the potential for creating a reliable source of controlled bound states for applications in quantum computing.

Keywords: soliton molecules; erbium-doped fiber laser; nonlinear polarization evolution; mode locking; quantum computing.

Введение

Волоконные лазеры как источник ультракоротких импульсов (УКИ) привлекательны благодаря компактности, надежности и высокой стабильности. Они востребованы в генерации оптических частотных гребёнок [1], в медицинских технологиях [2,3] и в лазерной обработке материалов [4,5]. Отдельный интерес представляет режим генерации солитонных молекул (СМ), при котором несколько импульсов образуют устойчиво связанную структуру с фиксированными временными интервалами и фазовыми соотношениями. Формирование СМ в волоконных лазерах определяется нелинейно-дисперсионной динамикой в резонаторе и может реализовываться с использованием искусственных насыщаемых поглотителей, включая нелинейные усиливающие петлевые зеркала (NALM) и нелинейную эволюцию поляризации (НЭП) [8,9]. Стабильные СМ высокого порядка демонстрировались в эрбиевых лазерах с пассивной синхронизацией мод [10,11], однако увеличение числа импульсов и сохранение кратко- и долговременной стабильности остаются ключевыми задачами.

В настоящей работе исследуется полностью волоконный эрбиевый кольцевой лазер с пассивной синхронизацией мод на основе НЭП и компенсацией дисперсии второго и третьего порядка. Показана самозапускающаяся генерация СМ управляемого порядка с перестройкой числа импульсов от 4 до 14 без распада синхронизации мод; длительность импульсов составляет порядка 500 фс. Полученные режимы характеризуются низким уровнем шума и высокой стабильностью, что делает систему перспективной для прецизионной фотоники и квантовых технологий на основе непрерывных переменных [6,7].

Экспериментальная установка

На рисунке 1 показана экспериментальная установка полностью волоконного кольцевого лазера, легированного эрбием, в качестве задающего генератора и источника СМ. В качестве активной среды было использовано EDF длиной 4,65 м с

положительной ДГС до +22,2 пс^2·км$^{-1}$ [12]. Относительно длинное эрбиевое волокно обеспечивало высокую эффективность, компенсируя аномальную дисперсию пассивной части резонатора и увеличивая нелинейность (диаметр модового поля 5,3 мкм при 1560 нм). Поглощение сигнала на длине волны 980 нм составляло 12 дБ/м. Другим преимуществом используемого EDF являлось то, что он имел отрицательную дисперсию третьего порядка (ДТП) (third-order dispersion, TOD), которая компенсировала положительную дисперсию третьего порядка пассивной части резонатора. В таблице 1 приведены дисперсионные характеристики всех используемых волокон. Кроме того, на рисунке 2 показаны суммарные параметры ДГС и ДТП в диапазоне длин волн генерации СМ. ДГС и ДТП равны нулю при 1540 нм и 1545 нм соответственно. На длине волны 1560 нм (центральная длина волны генерируемых СМ) ДГС $\approx -0{,}02$ пс^2, а ДТП $\approx -0{,}04$ пс^3. В большинстве случаев некомпенсированная ДТП влияет на процесс генерации, сужая коэффициент усиления активной среды [13] и приводит к искажению импульса, ограничивая расширение спектра под действием нелинейных эффектов [14]. Однако компенсация ДТП в представленной схеме позволила расширить спектр и увеличить порядок СМ без увеличения нелинейности посредством специальных высоконелинейных волокон.

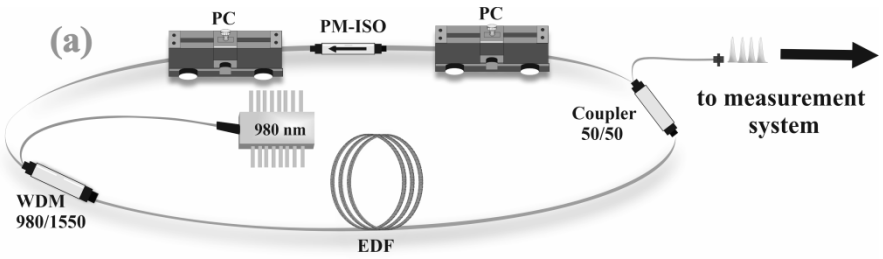


Рисунок 1 – Экспериментальная установка эрбиевого волоконного лазера

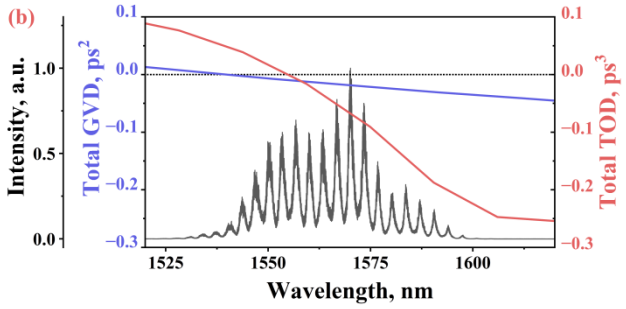


Рисунок 2 – Изменение параметров ДГС и ДТП в зависимости от длины волны и спектра СМ

Таблица 2 – Оптические характеристики используемых волокон

	EDF	SMF-28	HI1060 Flex
Длина, м	4,65	5,59	0,8
β_2, пс^2/км	+22,2	- 22,5	-7
β_3, пс^3/км	-0,01	+0,125	$4.6 \cdot 10^{-9}$
Диаметр модового поля, мкм	5,3	10,6	6,3

Нелинейная эволюция поляризации (НЭП) осуществлялась благодаря использованию изолятора с сохранением поляризации (polarization-maintaining isolator, PM-ISO) и двух поляризационных контроллеров (polarization controller, PC). Механизм НЭП был выбран в качестве искусственного насыщаемого поглотителя, подходящего для генерации СМ, как обсуждалось ранее. Кроме того, данный механизм позволяет избежать больших непросветляющихся потерь естественного насыщающего поглотителя внутри резонатора. Активная среда накачивалась с помощью диодного лазера с длиной волны 980 нм, через волоконный мультиплексор (wavelength devision multiplexor). Для вывода излучения из лазерного резонатора использовался волоконный сварной разветвитель с коэффициентом деления 0,5. Для получения импульсов с положительным чирпированием оптический соединитель был установлен непосредственно после EDF (на расстоянии ≈40 см от SMF-28). Общая длина резонатора составила 11,24 м. В качестве измерительной системы мы использовали следующие приборы: автокоррелятор: FR-103 WS FEMTOCHROME RESEARCH INC, Беркли, Калифорния, США, радиочастотный (РЧ) анализатор спектра: ESA FSL 3 model.03; Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, Мюнхен, Германия, оптический анализатор спектра: Ceyear, 6362D, Шэньчжэнь, Китай.

Результаты и обсуждение

При мощности накачки 377 мВт режим генерации СМ был достигнут в лазере путем настройки состояния контроллеров поляризации. Была достигнута генерация в режиме самозапуска со средней выходной мощностью 48 мВт, центральной длиной волны 1560 нм и частотой следования СМ 19 МГц. На рисунке 3 показаны основные характеристики полученного режима, последовательность импульсов во временной области (рисунок 3*a*) и частотной области в диапазоне [0 Гц, 200 МГц] (вставка на рис. 2 (b)). Основная частота повторения на частоте 19 МГц (рисунок 3*b*) имеет отношение

сигнал/шум (signal-noise ratio, SNR), равное 60,2 дБ. Кроме того, оптический спектр содержит характерную модуляционную картину с периодом компонент ≈3,3 нм. Последовательность импульсов в частотной и временной областях указывает на стабильность режима синхронизации мод. Более того, интенсивность автокорреляционной функции (рисунок 3*d*) показывает генерацию 14 связанных солитонов со средней длительностью импульса 508 фс и разделением импульсов ≈2,59 пс, период модуляции оптического спектра и межимпульсный временной интервал связаны соотношением $\Delta T = \lambda_0^2/(c \cdot \Delta\lambda)$, где c - скорость света, а λ_0 - центральная длина волны. Стабильная и симметричная автокорреляционная функция и высокостабильная последовательность импульсов (рисунок 3*a*) указывают на отсутствие модуляционной нестабильности, непрерывных компонент излучения или дисперсионных волн в полученном режиме генерации.

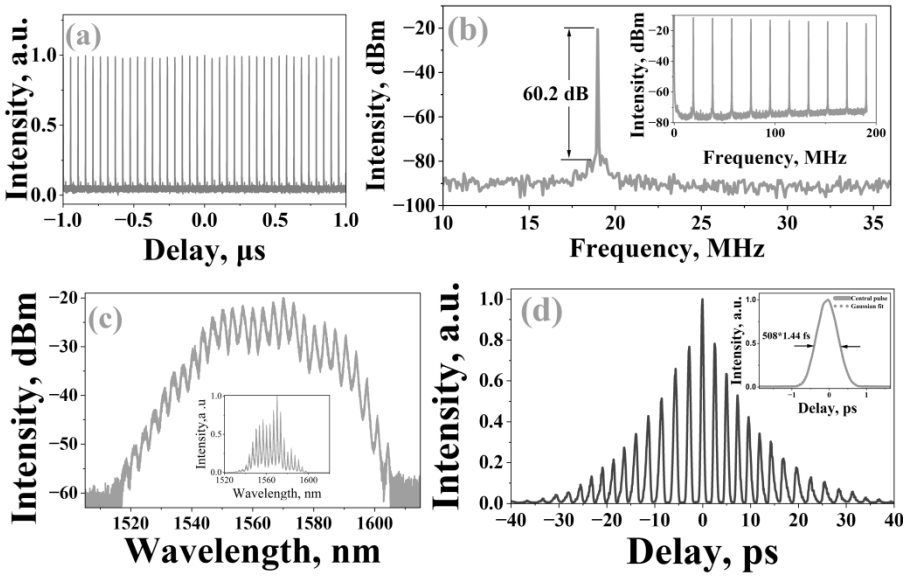


Рисунок 3 – Характеристики режима генерации СМ: *a* – последовательность импульсов, *b* – РЧ-спектр основной частоты и в диапазоне [0 Гц - 200 МГц] (вставка), *c* –оптический спектр и в относительных единицах измерения (вставка), *d* – автокорреляционная функция с центральным импульсом (вставка)

На рисунке 4*a*, 4*b* показано измерение спектральной плотности мощности (power spectral density, PSD) относительного уровня шума (RIN) в диапазоне [10 кГц - 1 МГц] с использованием анализатора РЧ-спектра и в диапазоне [1 кГц - 100 кГц]. Результаты представлены на рисунке 4. Синие линии обозначают уровень шума, соответствующий фотодетектору и используемому электрическому анализатору спектра, в то время как оранжевые линии обозначают PSD RIN лазера. Значение PSD RIN составило ≈ -125

дБн/Гц при частоте 1 МГц, что соответствует среднеквадратичному значению RIN, равному 0,080 % в диапазоне частот [10 кГц - 1 МГц]. Следует отметить, что пики уровня RIN на частоте 30 кГц (рисунок 4*a*) связаны с РЧ-помехами в измерительной системе и не генерируются лазером, поскольку они наблюдаются в измерительной схеме без подключения лазера. Кроме того, для определения долговременной стабильности была измерена девиация Аллана частоты повторения с помощью счетчика частоты Universal Counter 53132A, Agilent Inc., Санта-Клара, Калифорния, США (рисунок 5). Результаты свидетельствуют о долговременной стабильности генерируемых СМ с отклонением $1.98 \cdot 10^{-9}$ на временном интервале усреднения равном 1 с в течение 10-часового цикла измерения. Это значение близко к пределу погрешности частоты кварцевого генератора в используемом счетчике и определяется в основном температурным дрейфом на интервале времени усреднения [1 с - 100 с].

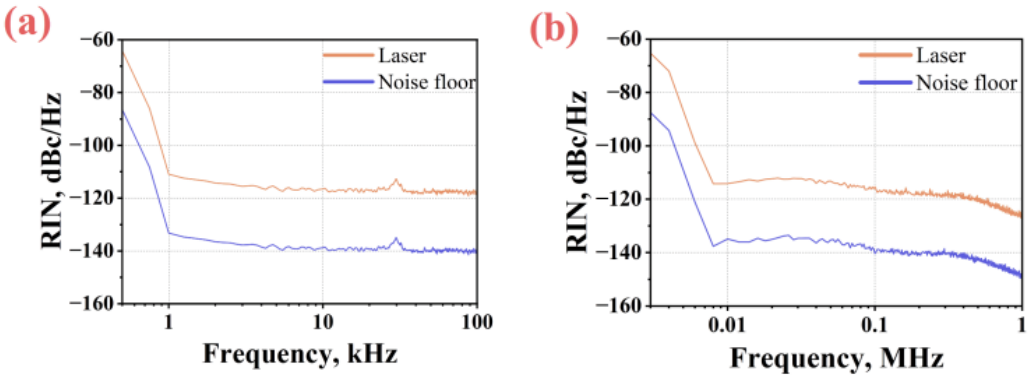


Рисунок 4 – RIN лазера в режиме генерации СМ вместе с минимальным уровнем шума измерительной системы: *a* – диапазон 1 кГц - 100 кГц, *b* – диапазон 10 кГц - 1 МГц

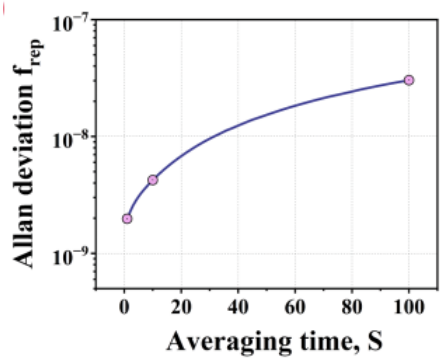


Рисунок 5 – Девиации Аллана частоты повторения СМ

Согласно теории квантования энергии в лазерном резонаторе, описанной в [15], количеством солитонов можно управлять несколькими способами. Эти методы включают в себя изменение дисперсии, нелинейности или глубины модуляции используемого насыщаемого поглотителя, в работе [15] управление порядком СМ

проводилось путем изменения состояния регуляторов поляризации, что приводит к изменению функции пропускания НЭП и изменению условий работы режима синхронизации мод. Однако наиболее эффективным и воспроизводимым методом управления количеством солитонов является контроль внутрирезонаторной нелинейности путем изменения мощности накачки, поскольку с увеличением мощности накачки эффекты нелинейности (фазовая самомодуляция, кросс-фазовая модуляция) усиливаются, что приводит к расширению спектра и расщеплению солитонов, как обсуждалось во введении. Изменение мощности накачки может происходить без изменения конфигурации резонатора, что позволяет управлять нелинейным процессом и количеством солитонов без нарушения режима синхронизации мод.

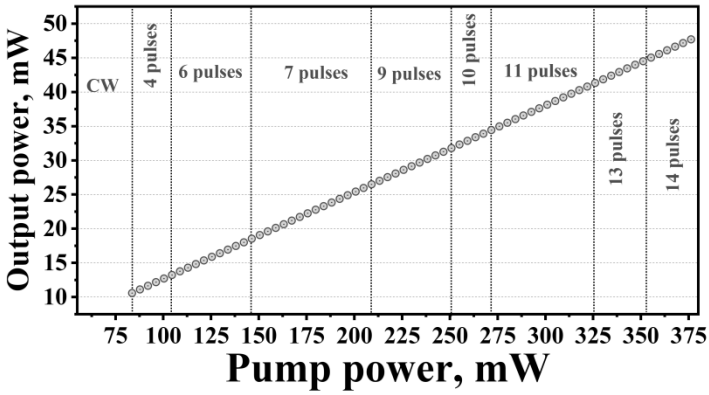


Рисунок 6 – Выходная мощность и количество импульсов в зависимости от мощности накачки

В работе синхронизация мод была достигнута при 375 мВт (максимальная мощность накачки), после чего мощность накачки плавно уменьшалась с небольшим шагом (≈ 4 мВт), что приводило к изменению количества импульсов с 14 до 13, 11, 10, 9, 7, 6 и 4, соответственно. Стоит также отметить, что полученный режим генерации имел низкий порог синхронизации мод (83,6 мВт), при превышении этого значения автоматически запускался режим генерации 4 импульсов в режиме СМ. Однако изменения в количестве импульсов происходили не последовательно (генерация 5, 8 и 12 импульсов не была замечена даже при повторном изменении мощности накачки с шагом ≈1 мВт), это связано с механизмом квантования и стабильностью состояния между солитонами после расщепления импульсов.

На рисунке 7 показан оптический спектр и автокорреляционная функция полученных режимов генерации СМ при различном количестве импульсов. Уширение

спектра в данном случае объясняется увеличением нелинейности резонатора при повышении мощности накачки. Период модуляции в спектре составлял 3,3 нм для всех полученных режимов генерации, в то время как количество спектральных компонент увеличивалось при изменении мощности накачки. Более того, симметричные автокорреляционные картины без пьедесталов указывают на изменение количества импульсов, без негативного влияния на стабильность синхронизации мод.

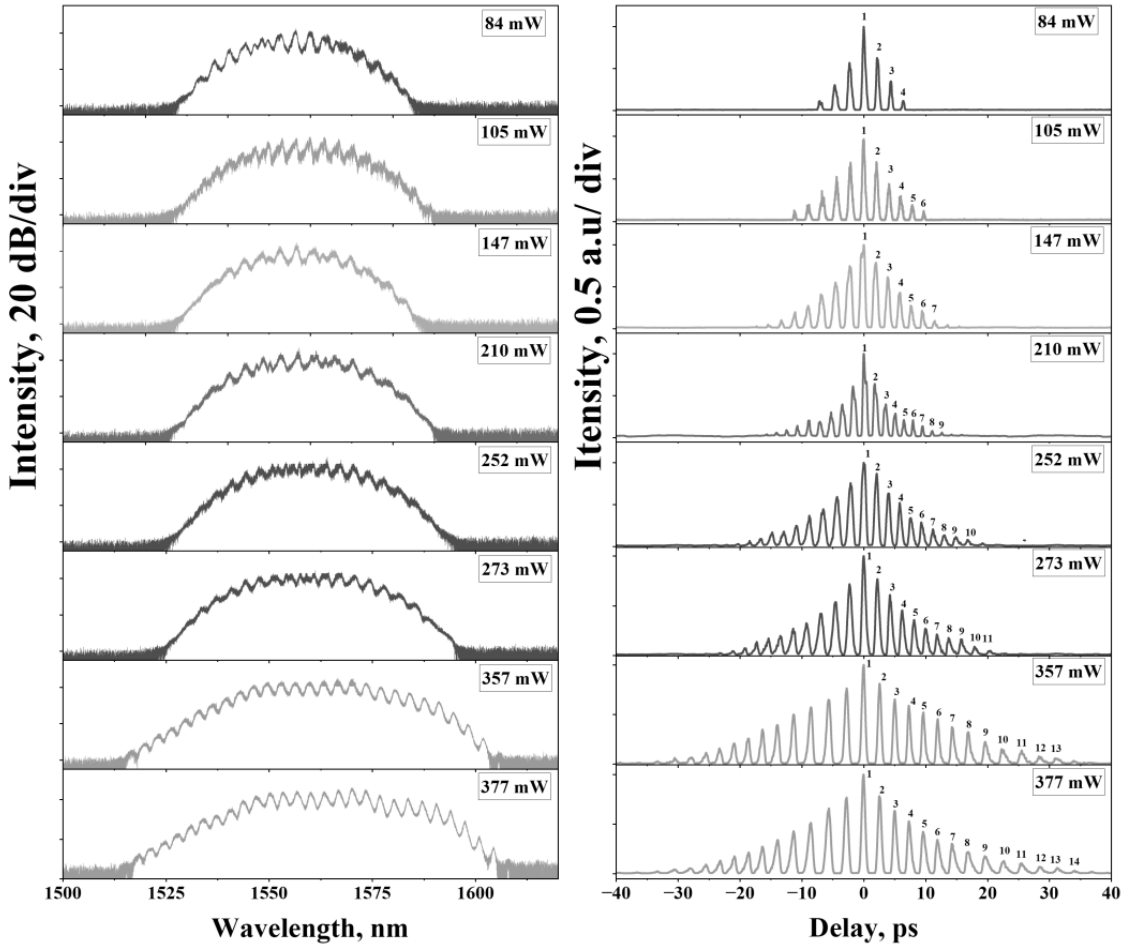


Рисунок 7 – Оптический спектр и автокорреляционная функция СМ в зависимости от мощности накачки.

Предполагая, что солитоны имеют одинаковую интенсивность, энергию каждого импульса можно определить по формуле $E = P_{avg}/(f_{rep} \cdot N)$, где N - порядок СМ (количество импульсов), а P_{avg} - средняя мощность. В этом случае пиковая мощность каждого импульса (с учетом приближения по гауссовой форме) вычисляется по формуле $P_{peak} = 0{,}94E/\tau$, где τ - длительность импульса. На рисунке 8 показана эволюция энергии импульса и пиковой мощности в зависимости от порядка СМ. Если сравнить случай с 4 солитонами ($P_{avg} = 10{,}6$ мВт) и случай с 14 импульсами ($P_{avg} =$

48 мВт), можно отметить, что энергия импульса немного увеличилась, в то время как пиковая мощность снизилась с 330 Вт до 310 Вт, несмотря на увеличение средней мощности в 4 раза. При сравнении одноимпульсных режимов с генерацией 14-импульсного режима СМ при одинаковых характеристиках ($P_{avg} = 48$ мВт, $\tau = 508$ фс, и $f_{rep} = 19$ МГц), можно отметить значительную разницу в пиковой мощности. Так, например, пиковая мощность одиночного импульса достигает приблизительно $P_{peak} \approx 4{,}7$ кВт по сравнению всего с 310 Вт в режиме генерации СМ. Это уникальное преимущество СМ по сравнению с одноимпульсными режимами. Таким образом, лазеры, генерирующие СМ, могут выступать в качестве источника УКИ с высокой средней мощностью, при сохранении низкой пиковой мощности, что позволит уменьшить негативные нелинейные эффекты. Кроме того, как обсуждалось ранее, увеличение мощности накачки во время генерации СМ позволяет увеличить пиковую мощность в определенных диапазонах и для определенного количества импульсов за счет квантования энергии внутри резонатора без нарушения режима синхронизации мод. Эти выводы подчеркивают устойчивость СМ по сравнению с одноимпульсными режимами генерации УКИ и предполагают потенциальные улучшения для областей применения, где требуется получение высокой средней выходной мощности, при сохранении невысокой пиковой.

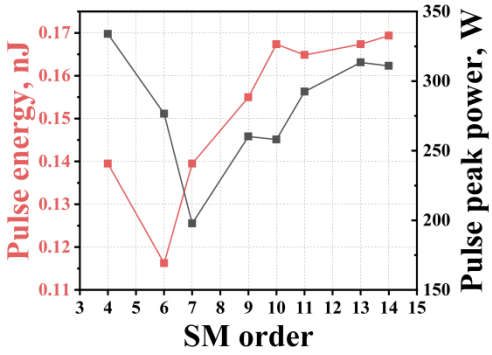


Рисунок 8 – Изменение энергии импульса и пиковой мощности в зависимости от порядка СМ

Заключение

В работе была продемонстрирована генерация стабильного режима СМ в полностью волоконном эрбиевом лазере. Управление порядком СМ путем изменения мощности накачки показало возможность генерировать режимы с 4, 6, 7, 9, 10, 11, 13 и 14 связанными импульсами без нарушения режима синхронизации мод. Средняя

длительность импульсов составила ≈ 500 фс. Кроме того, было продемонстрировано управление количеством импульсов путем изменения мощности накачки. Было продемонстрировано, что увеличение порядка солитонных молекул при росте мощности накачки позволяет достичь значительной средней выходной мощности (до 48 мВт) без существенного роста пиковой мощности (310 Вт). Это помогает минимизировать возникновение нежелательных нелинейных эффектов, характерных для режимов с высокой пиковой мощностью. Такое решение может стать основой для создания компактного и надежного генератора, применимого в системах квантовых вычислений. Особенно это актуально для квантовых технологий, основанных на использовании непрерывных переменных.

Литература

1. Rauschenberger J., Fortier T.M., Jones D.J., Ye J., Cundiff S.T. Control of the frequency comb from a mode-locked Erbium-doped fiber laser // Optics Express. 2002. Т. 10. № 24. С. 1404–1410.
2. Katz T.M., Firoz B.F., Goldberg L.H., Friedman P.M. Treatment of Darier's Disease Using a 1,550-nm Erbium-Doped Fiber Laser // Dermatologic Surgery. 2010. Т. 36. С. 142–146.
3. Wanner M., Tanzi E.L., Alster T.S. Fractional Photothermolysis: Treatment of Facial and Nonfacial Cutaneous Photodamage with a 1,550-nm Erbium-Doped Fiber Laser // Derma-tologic Surgery. 2007. Т. 33. С. 23–28.
4. Mizunami T., Ehara A. Femtosecond-pulsed laser micromachining and optical damage by an erbium-doped fiber-laser system // Microelectronic Engineering. 2011. Т. 88. С. 2334–2337.
5. Sugioka K. Will GHz burst mode create a new path to femtosecond laser processing? // International Journal of Extreme Manufacturing. 2021. Т. 3. С. 043001.
6. Lloyd S., Braunstein S.L. Quantum Computation over Continuous Variables // Physical Review Letters. 1999. Т. 82. С. 1784.
7. Pfister O. Continuous-variable quantum computing in the quantum optical frequency comb // Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics. 2019. Т. 53. С. 012001.

8. Zhou R., Chen S., Li Q., Fu H.Y., Nakkeeran K. Supercontinuum comb generated by soli-ton molecule pulse laser injecting into a nonlinear amplifying loop mirror // Optics & Laser Technology. 2022. T. 150. C. 107884.
9. Luo Y., Xiang Y., Liu B., Qin Y., Sun Q., Tang X., Shum P.P. Dispersion-Managed Soli-ton Molecules in a Near Zero-Dispersion Fiber Laser // IEEE Photonics Journal. 2018. T. 10. C. 7105210.
10. Orekhov I., Ismaeel A., Lazdovskaia U., Dvoretskiy D., Sazonkin S., Karasik V., Denisov L. Soliton molecules order control and their propagation features in an anomalous disper-sion optical fiber // Optics & Laser Technology. 2024. T. 171. C. 110444.
11. Dvoretskiy D.A., Sazonkin S.G., Kudelin I.S., Orekhov I.O., Pnev A.B., Karasik V.E., Denisov L.K. Multibound Soliton Formation in an Erbium-Doped Ring Laser with a High-ly Nonlinear Resonator // IEEE Photonics Technology Letters. 2020. T. 32. C. 43–46.
12. Krylov A.A., Sazonkin S.G., Kosolapov A.F., Pryamikov A.D., Kolyadin A.N., Bufetov I.A. Fibre-optic 100 fs pulse amplification and transmission system in the telecom range // Quantum Electronics. 2018. T. 48. C. 589–595.
13. Fermann M.E., Galvanauskas A., Sucha G., Harter D. Fiber-lasers for ultrafast optics // Applied Physics B. 1997. T. 65. C. 259–275.
14. Shah L., Fermann M. High-power ultrashort-pulse fiber amplifiers // IEEE Journal on Se-lected Topics in Quantum Electronics. 2007. T. 13. C. 552–558.
15. Tang D.Y., Zhao L.M., Zhao B., Liu A.Q. Mechanism of multisoliton formation and soli-ton energy quantization in passively mode-locked fiber lasers // Physical Review A. 2005. T. 72. C. 043816.

УДК 62-272.5

ГИБКИЕ МЕХАНИЗМЫ В ТОЧНОМ ПРИБОРОСТРОЕНИИ

С.Р. Кисленко

E-mail: ki5le@yandex.ru

Аннотация: Благодаря развитию аддитивных технологий возрос интерес исследователей к гибким шарнирам, получившим широкое распространение в робототехнике. Механизмы нашли применение и в других отраслях: в медицине, машиностроении и приборостроении, микроэлектронике. В данной статье приведены возможные варианты применения таких механизмов для прецизионных (оптических) приборов.

Ключевые слова: гибкие механизмы, прецизионные приборы, кинематика.

CONSTRAINTS MECHANISMS IN PRECISION INSTRUMENTATION

S.R. Kislenko

E-mail: ki5le@yandex.ru

Abstract: Due to the development of additive technologies, researchers have increased their interest in flexible hinges, which are widely used in robotics. The mechanisms have also found application in other industries: medicine, mechanical engineering and instrumentation, and microelectronics. This article presents possible applications of such mechanisms for precision (optical) devices.

Keywords: constraints mechanisms, precision instruments, kinematics.

Введение

Гибкие (или податливые) монолитные механизмы, как альтернатива жёстким, звеньевым механизмам, известны достаточно давно (рисунок 1).

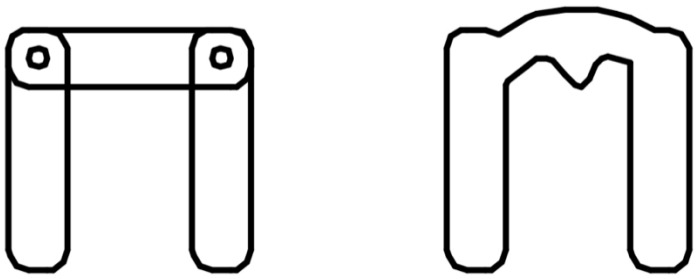


Рисунок 1 – Жёсткий (слева) и гибкий (справа) механизмы

Работа гибкой механики основана на накоплении и дальнейшем высвобождении внутренней энергии за счёт упругой деформации [1]. Сфера применения таких механизмов не ограничивается бытовыми приложениями, известны примеры их использования в космической промышленности, авиастроении, биомедицине и МЭМС-устройствах (рисунок 2) [2, 3].

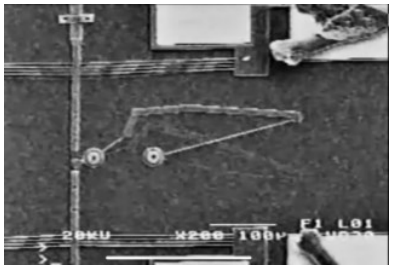
Гибкие шарниры, с одной стороны, должны обладать достаточной податливостью для совершения полезной работы, а с другой стороны, должны быть жёсткими, особенно в крайних положениях для обеспечения кинематического замыкания. Постановка прямой задачи проектирования для таких механизмов в общем случае не составляет вычислительной сложности и не имеет единственного решения, обладает вариативностью, в то время как решение обратной задачи (по требуемому виду и значению перемещения найти геометрические параметры механизма) требует значительных вычислительных мощностей [4].

Требования к материалам механизмов вытекают из функционального назначения механизмов. Это и высокий модуль упругости, и небольшие значения ТКЛР и плотности. В качестве материалов обычно используются следующие: алюминиевые сплавы (АД-33, Д16Т) (высокий ТКЛР вынуждает термостабилизировать системы); титан и его сплавы, инвар (недостатком является сложная механическая обрабатывемость и высокие магнитные свойства); ABS-пластик и композиты (предел прочности на растяжение для ABS-пластика 41,4 МПа); бериллиевые бронзы (БрБ2) [9]. Материалами могу выступать и нетипичные представители, например, сталь и даже кремний. Это возможно благодаря фигурной конструкции деталей, где особое место занимает сплайновое сочленение. Гибкие микромеханизмы могут получены стандартными операциями обработки, например, травлением.

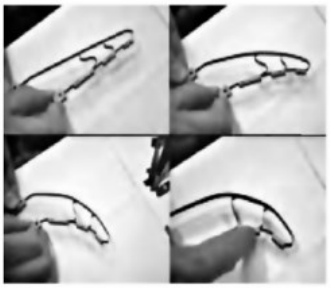
а)

б)

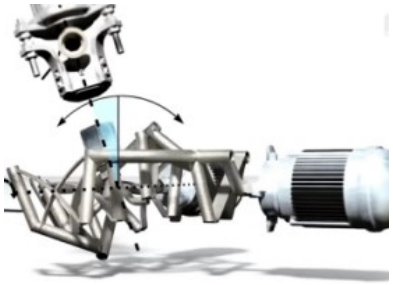
в)



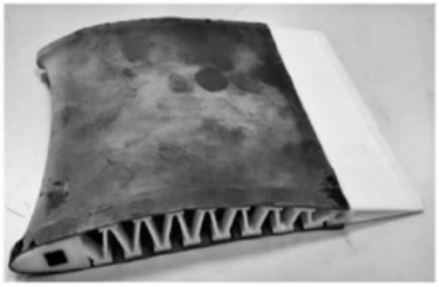
г)



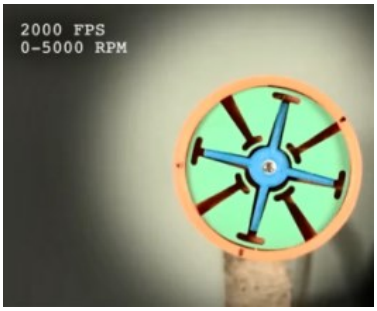
д)



е)



ж)



з)

Рисунок 2 – Примеры использования гибких механизмов: *а* – фастекс, *б* – гибкий механизм зажима [5], *в* – переключатель (ключ) [6], *г* – микропереключатель, *д* – протез пальца [7], *е* – механизм отклонения двигателя космического аппарата, *ж* – гибкая конструкция крыла самолёта [8], *з* – гибкая муфта

Необходимо отметить важные преимущества таких механизмов:

1. Дешевизна, компактность и технологичность. Используется минимальное количество (обычно не более 2) деталей. основные способы изготовления – литьё, экструзия или 3D-печать;

2. Отсутствие люфта, износа, необходимости смазки, нежелательных эффектов;

3. Высокая точность;

4. Лёгкая масштабируемость;

5. Надёжность.

Некоторые недостатки:

1. Ограниченный диапазон работы;

2. Нелинейное поведение механизма, обусловленное видом нагрузки.

В данной статье предложены принципиальные схемы механизмов, которые могут найти применение в оптическом приборостроении.

Основные зависимости

В практике разработки гибкой механики наиболее эффективен метод рекурсивного прототипирования, основанного на топологической оптимизации с помощью конечно-элементной сетки и сплайновых сегментов [10].

Моделирование гибких механизмов основана на квазистатической (псевдожёсткой) модели (рисунок 3) [11], которая в общем виде описывается выражением:

$$\min_{x,s} G(p) \quad \Rightarrow \quad C(\overset{\cup}{x},\overset{\cup}{s}) = 0,$$

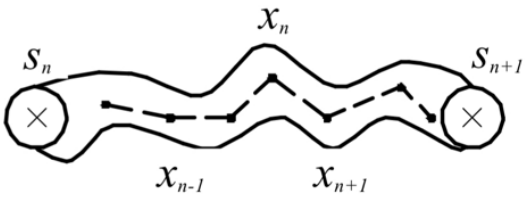
где $\overset{\cup}{x},\overset{\cup}{s}$ – вектор степеней свободы узлов и сегментов, G – полная потенциальная энергия, C – функция параметров проектирования, p – характеристический параметр. Целевая функция траектории механизма может быть представлена уравнением:

$$f = \frac{1}{2}\sum_t \| z_t(x_t, s_t) - \hat{z}_t \|^2,$$

где z_t – дискретный набор точек, определяющий положение механизма, $\hat{z}_t$ – целевой вектор, определённый входным воздействием.

Топологическая оптимизация механизмов характеризуется выражением для аддитивной функции градиента параметров:

$$\frac{\partial f(p, y(p))}{\partial p} = 0.$$



$$grad(f(p,x,s))=0$$

Рисунок 3 – Квазистатическая модель гибкого механизма

Приведённые выражения могут быть использованы и для синтеза «полугибких» механизмов (имеющих, наряду с подшипниками, гибкие сочленения), если изменить граничное условие для жёстких узловых точек.

Упругие элементы в механизмах перемещения (фокусировки)

В работе механизмов фокусировки наряду с вопросами обеспечения точности позиционирования и стабильности возникают вопросы силового замыкания. В роли замыкающих элементов обычно выступают пружины или мембраны. Заменой могут выступать и гибкие механизмы, если принять их небольшой диапазон перемещений. Так, на рисунке 4 приведён гибкий элемент и пружина механизма фокусировки для осесимметричной оптической системы. В простейшем случае гибкий элемент представляет собой монолитную конструкцию, соединение «толкателя» с неподвижным корпусом (оправой) осуществляется с помощью набора консолей. Количество, габариты таких консолей, в общем случае зависят от необходимой нагрузки, перемещения и материала.

Источником силового воздействия могут выступать кулачковые, винтовые механизмы или напрямую подстыкованный линейный пьезо- или шаговый двигатель.

а) б)

Рисунок 4 – Реализации упругого элемента: *а* – гибкий механизм (показана половина), *б* – пружина

На рисунке 5 изображена возможная схема применения механизма. В случае использования полой «пружины», она может дополнительно выполнять функцию бленды.

Подобные механизмы могу найти применение в оптических систем, работающих при различных температурных режимах. Подбор геометрических параметров позволяет найти оптимальные значения для усилия и перемещения.

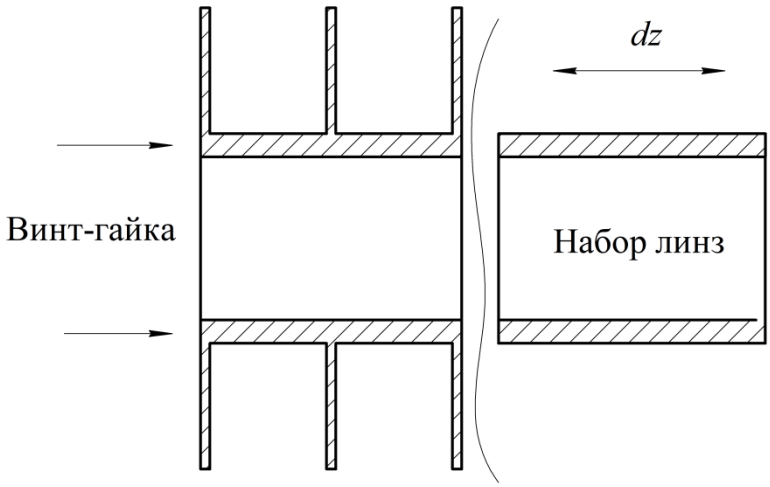
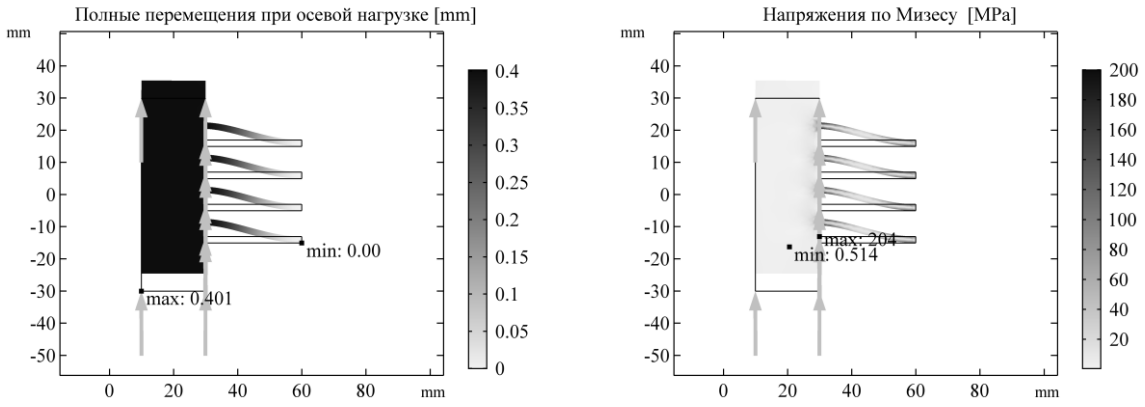
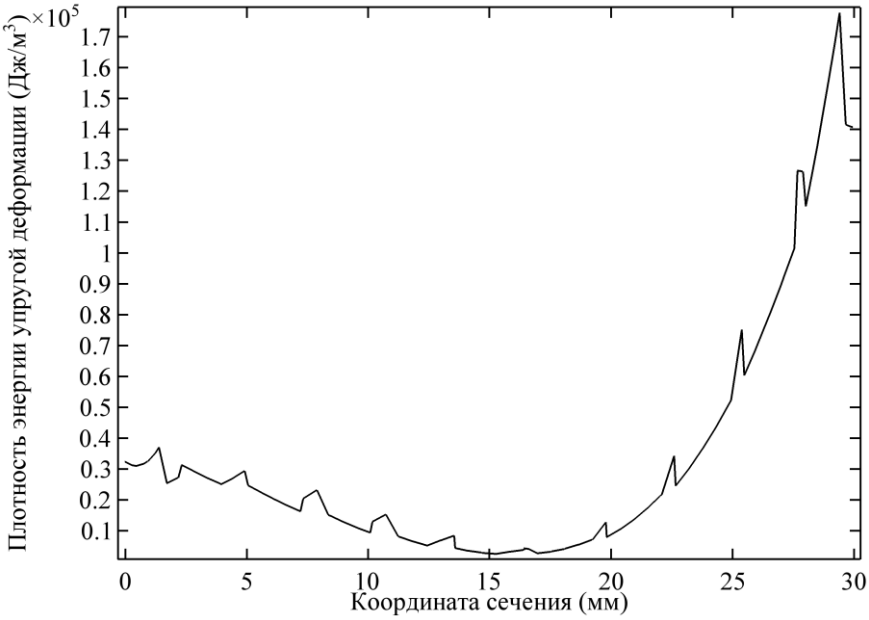


Рисунок 5 – Схема возможной реализации упругого механизма

На рисунке 6 представлены результаты расчёта для алюминиевого элемента (предел текучести сплава Д16Т 260 МПа), а также пример использования в оптической системе. Механизм при относительно небольших габаритах позволяет обеспечить перемещение 0,4 мм с усилием 10000 Н.



а) б)



в)

Рисунок 6 – Статическое нагружение: *а* – деформации, *б* – напряжения по Мизесу, *в* – распределение плотности энергии упругой деформации по сечению консолей

Юстировочные механизмы и приспособления

Известно, что в оптическом производстве бóльшая часть время- и трудозатрат приходится на сборку и юстировку. Для юстировочных узлов оригинальной конструкции пишутся методики. Гибкие механизмы могут значительно облегчить труд юстировщиков, поскольку меньшее количество кинематических ступеней обеспечивает отсутствие накопления дополнительных погрешностей. На рисунке 7 показан механизм центрирования оптического блока (сплав Д16Т, титан, инвар). Разрезная 4-х сегментная площадка находится на 4-х

фасонных «ножках», угловая нагрузка позволяет менять наклон сегмента. Здесь расчётными значения можно задать аналогично усилие, угловое перемещение и материал, угол скоса торца, к которому будет приложена нагрузка. Такая конструкция может быть использована для обработки, например, зеркала с выдержкой заданных геометрических параметров или при сборке зеркального узла (рисунок 8) с помощью дополнительного контрольно-измерительного оборудования. В этом случае зеркало можно закрепить на сегментной площадке приспособления приклеиванием.

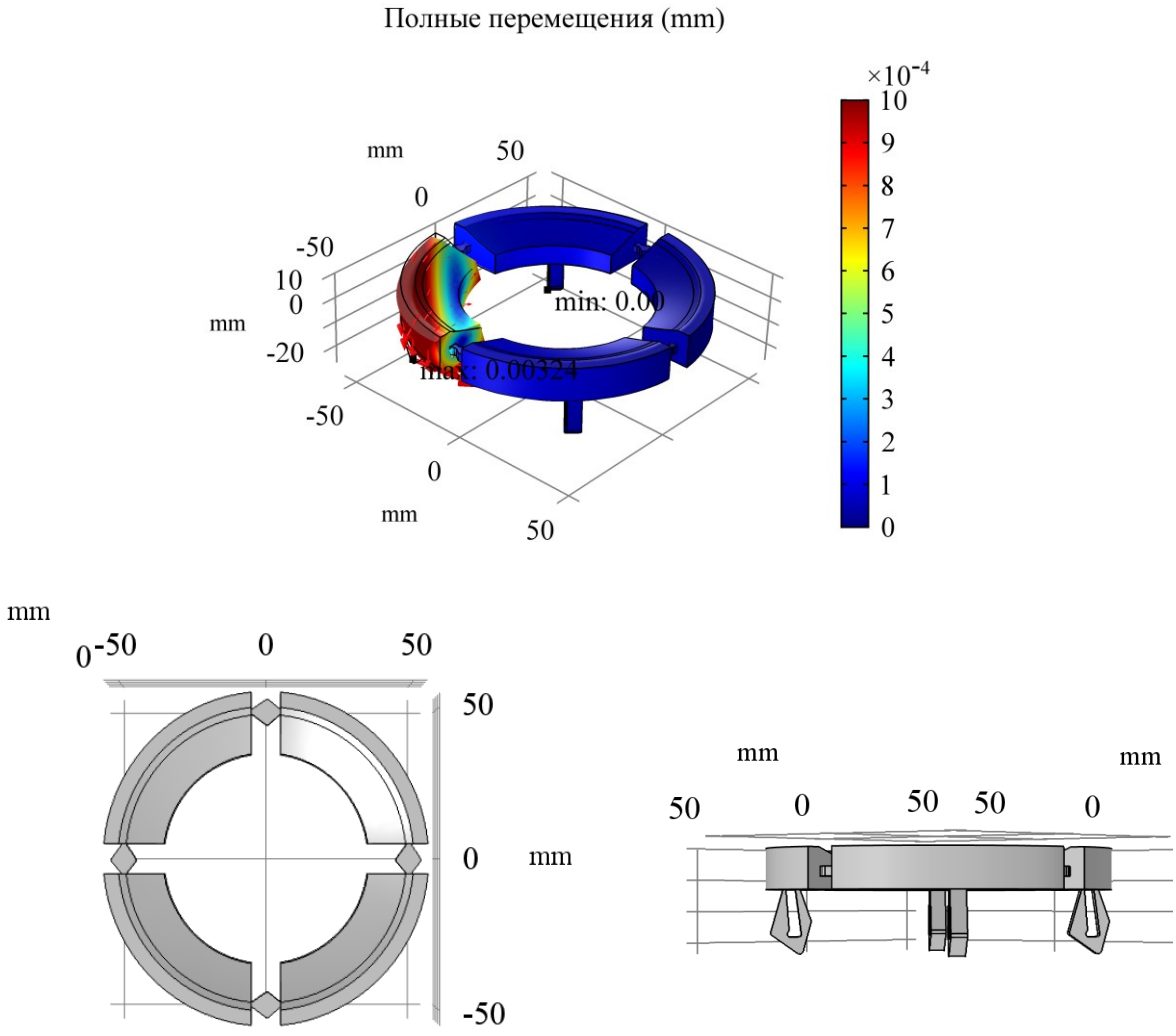


Рисунок 7 – Механизм центрирования оптического блока (3 остальных сегмента зафиксированы)

Прикладывая нагрузку к одному из 4 сегментов, можно менять наклон оптической детали с шагом 0,001 мм.

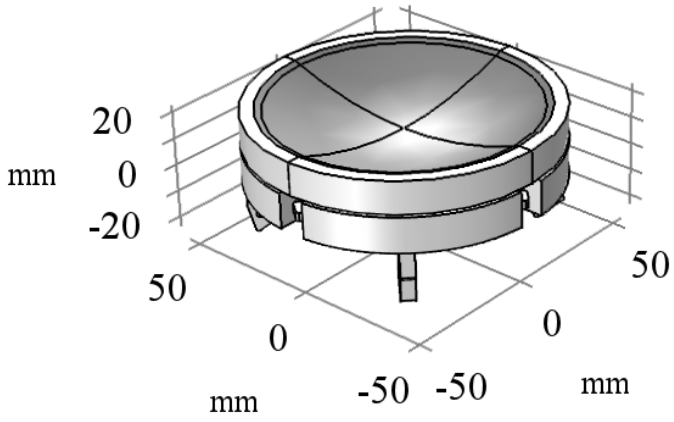


Рисунок 8 – Пример использования приспособления

Крепление оптических деталей – «гибкая завальцовка»

Для крепления оптических деталей в неответственных узлах, например, в осветительных системах, применяется завальцовка, неразборный тип крепления, который в контексте гибкой механики может быть реализован как разъёмное соединение (рисунок 9). Отгибание опорных граней производится с помощью приспособления, напоминающего клещи для снятия стопорных или поршневых колец (необходимо 4 клешни) и технологических отверстий на торцах (рисунок 10).

Материал – пластики, что ограничивает сферу применения такого способа.

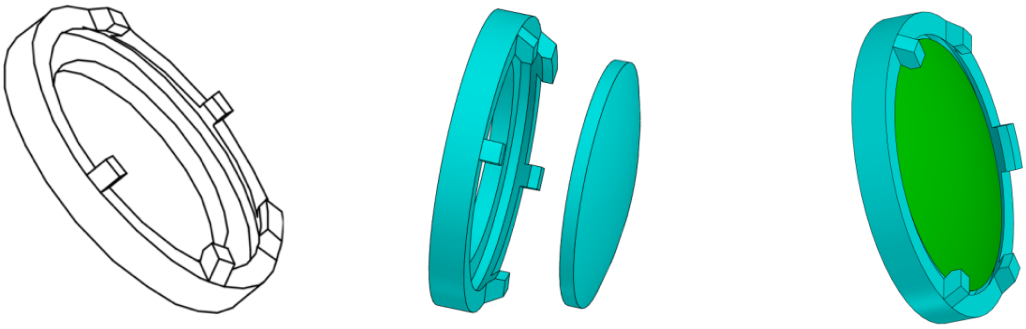


Рисунок 9 – Оправа для крепления оптических деталей гибкой завальцовкой

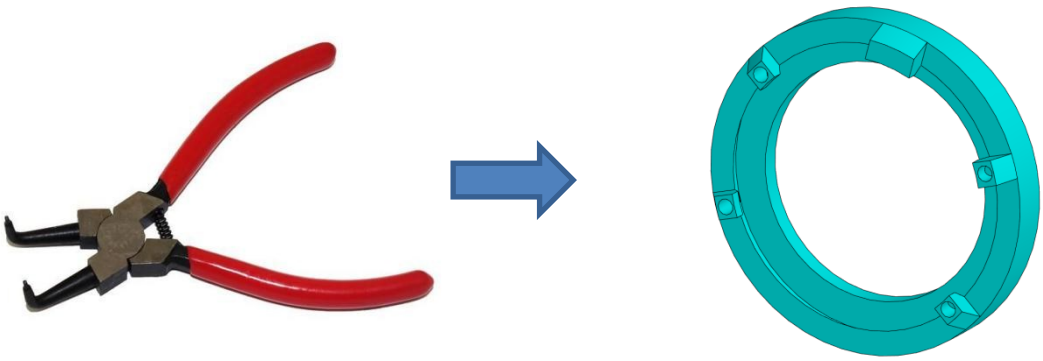


Рисунок 10 – Технологическая реализация соединения гибкой завальцовкой

Заключение

Показаны варианты реализации гибких механизмов в точном приборостроении. Как видно, гибкая механика применима, как альтернатива, во множестве конструктивных решений и должна активнее внедряться в различных сферах приборостроения, а также в космической промышленности, где вопросы массо-габаритных показателей стоя́т наиболее остро.

Литература

1. Frecker M I and Canfield S 2007 Methodology for systematic design of compliant mechanism with integrated smart materials Forthcoming.
2. Jagtap, S & Deshmukh, B & Pardeshi, Sujit. (2021). Applications of compliant mechanism in today's world – A review. Journal of Physics: Conference Series. 1969. 012013.10.1088/1742-6596/1969/1/012013.
3. Интернет-ресурс. URL:https://vk.com/video55155418_456241911?ysclid=mk2mb5fwh0476353402 (дата обращения: 10.12.2025).
4. L.L. Howell, "Compliant Mechanisms", John Wiley, New York, 2001
5. https://www.compliantmechanisms.byu.edu/about-compliant-mechanisms
6. Интернет-ресурс. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Compliant_mechanism (дата обращения 25.12.2025).
7. Steutel P, Kragten G A, and Herder J L 2010 Design of an underactuated finger with amonolithic structure and distributed compliance, ASME Design Engineering Technical Conferences, DETC10/DAC.

8. M.S Parancheerivilakkathil et. al 2019, A compliant polymorphing wing for small UAV's, Chinese Journal of aeronautics & astronautics.

9. Механизмы перспективных робототехнических систем Под редакцией В.А. Глазунова, С.В. Хейло М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. – 296 стр. ISBN 978-5-94836-6043.

10. Frecker M, Kikuchi N & Kota S. Topology optimization of compliant mechanisms with multiple outputs. Structural Optimization 17, 269–278 (1999). https://doi.org/10.1007/BF01207003.

11. B. Zhu, X. Zhang, H. Zhang, J. Liang, H. Zang, H. Li, and R. Wang,
"Design of compliant mechanisms using continuum topology optimization: A review," Mechanism and Machine Theory, vol. 143, no. 103622, 2020.