



ЭЛ №ФС77-57961
ISSN:2313-8459

«КОНТЕНАНТ»

ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том 24, №2, 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.

СОДЕРЖАНИЕ

Нога А.Р., Тимашова Л.Н.

Методы комплексирования многоспектральных изображений 2

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

Подводные видеокамеры для рыбалки 13

Ю.В. Федотов, Нгуен Минь Бач, Н.В. Барышников, М.Л. Белов

Исследование эффективности метода мониторинга загрязнений
нефтепродуктами земной поверхности в ближней ИК области спектра 56

А.П. Семенов, М.А. Абдулкадыров, А.Н. Игнатов, В.Е. Патрикеев, А.Д.

Тамбовский, В. Н. Кудиков, В.В. Придня, Кудрявцев А.В., А.В. Маркин
Способ контроля и формообразования выпуклых высокоасферичных
поверхностей оптических зеркал 66

А.А. Шкарупило, М.Л. Белов, С.Е. Иванов, Ю.В. Федотов, Н.В.

Барышников

Исследование спектров отражения пород деревьев Европейской части РФ в
видимом и ближнем инфракрасном спектральных диапазонах в период
начала лета 87

Вязовых М.В., Козырев В.Д., Ковтун А.А., Соколовский В.А.

Алгоритмы комплексирования телевизионных и тепловизионных изображений
для повышения эффективности мультиспектрального распознавания
объектов оператором 98

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 20.10.2025
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»

МЕТОДЫ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Нога А.Р., Тимашова Л.Н.

Аннотация: Статья посвящена актуальной проблеме – комплексированию изображений, зарегистрированных в разных спектральных диапазонах. В работе рассмотрены и описаны основные методы формирования комплексированных изображений в многоспектральных оптико-электронных приборах, проведен их анализ и сравнение. Исследование методов проводилось на изображениях, смоделированных в двух диапазонах – ближнем и дальнем ИК-диапазонах.

Ключевые слова: комплексирование изображений, многоспектральные системы.

MULTISPECTRAL IMAGE FUSION TECHNIQUES

Noga A.R., Timashova L.N.

Abstract: This paper investigates image fusion techniques for multispectral optoelectronic systems, focusing on short-wave (SWIR) and long-wave (LWIR) infrared bands. We analyze and compare principal fusion methodologies for enhanced imaging applications.

Keywords: image fusion, multispectral systems.

Введение

В современной науке и технике наблюдается устойчивая тенденция к разработке и совершенствованию мультиспектральных оптико-электронных систем (МОЭС), работающих одновременно в различных спектральных диапазонах. Этот технологический прорыв обусловлен комплексом факторов, среди которых особое значение имеют достижения в области создания высокочувствительных матричных приёмников излучения (МПИ) для ближнего ИК-диапазона, а также значительный прогресс в разработке тепловизионных МПИ.

Параллельно с усовершенствованием элементной базы происходит активное развитие алгоритмического обеспечения, включающего современные методы цифровой обработки и компьютерного анализа оптических изображений. Внедрение

нейросетевых технологий и машинного обучения позволило достичь принципиально нового уровня информативности получаемых данных. Особую актуальность распределенные МОЭС приобрели в контексте решения задач обеспечения национальной безопасности, противодействия террористическим угрозам и мониторинга критически важных объектов инфраструктуры.

Современные системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), основанные на МОЭС, обеспечивают непрерывный контроль экологической обстановки с возможностью детектирования и классификации широкого спектра природных и антропогенных объектов. Ключевые области применения включают: мониторинг состояния сельскохозяйственных угодий и лесных массивов, контроль целостности магистральных трубопроводных систем, оперативное обнаружение очагов природных пожаров, выявление зон теплового загрязнения окружающей среды, оценку последствий чрезвычайных ситуаций

Современные МОЭС интегрируют передовые технологии комплексирования мультиспектральных данных, что обеспечивает: повышение достоверности распознавания объектов, увеличение пространственного разрешения, улучшение соотношения сигнал/шум, расширение динамического диапазона [1].

Реализация этих возможностей стала возможной благодаря разработке инновационных алгоритмов обработки изображений, включая методы адаптивной фильтрации, морфологического анализа и многомерной классификации.

Регистрация изображений в видимом диапазоне (VISIBLE, 0.4-0.7 мкм) обладает существенными ограничениями. Основным недостатком является выраженная зависимость от условий освещения - в ночное время наблюдается значительное снижение контраста изображения, что существенно уменьшает вероятность обнаружения объектов. Дополнительным фактором, ухудшающим качество изображения, является атмосферное рассеяние (Рэлеевское рассеяние на молекулах воздуха), особенно проявляющееся при наличии тумана, дымки или осадков. Необходимость использования дополнительной подсветки в условиях недостаточной освещенности не только усложняет конструкцию прибора, но и повышает вероятность его обнаружения.

Спектральные характеристики многих материалов (искусственных покрытий, различных типов растительности и др.) в видимом диапазоне демонстрируют схожие отражательные свойства, что затрудняет их различие и, соответственно, идентификацию. В отличие от видимого диапазона, ближний ИК-диапазон (SWIR, 0.9-

1.7 мкм) обладает рядом преимуществ, связанных с наличием атмосферных окон прозрачности, обусловленных спецификой поглощения излучения молекулами воды и атмосферных газов. На рисунке 1 показана зависимость коэффициента пропускания атмосферы от длины волны.

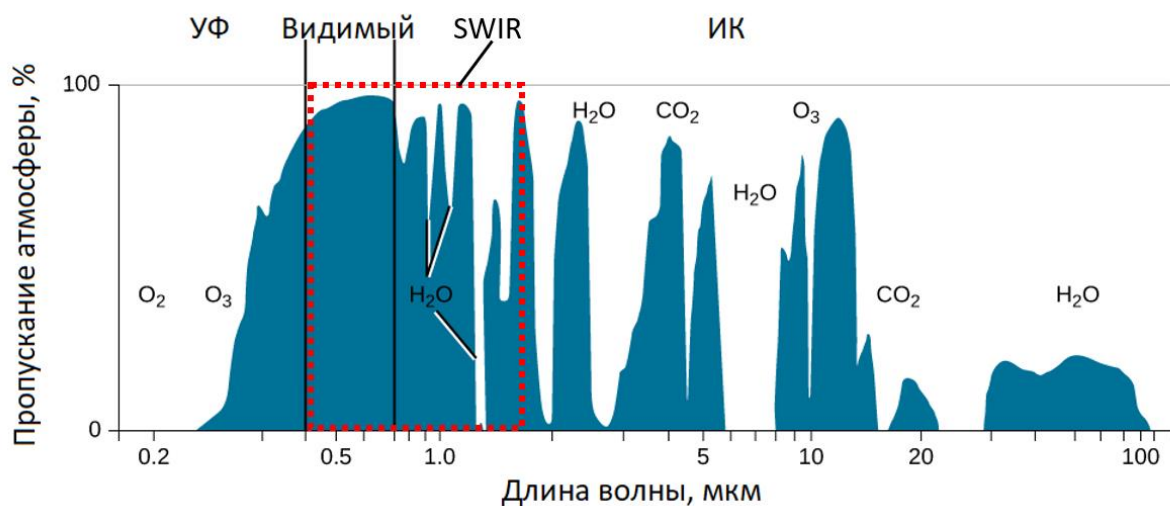


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента пропускания атмосферы от длины волны

Регистрация в SWIR диапазоне обеспечивает повышенный контраст между искусственными и природными объектами и, например, эффективное распознавание камуфляжных покрытий, улучшенную видимость в условиях задымления и запыления, а также возможность ночного наблюдения за счет регистрации при естественном свечении атмосферы.

На рисунке 2 представлены сравнительные изображения одной объектной сцены в видимом и SWIR диапазонах.



Рисунок 2 – Изображение в видимом и SWIR диапазонах

Средневолновый (MWIR, 3-5 мкм) и длинноволновый (LWIR, 8-12 мкм) инфракрасные диапазоны принципиально отличаются от видимого и SWIR-диапазонов тем, что регистрируют собственное тепловое излучение объектов, а не отраженный свет. Это обеспечивает следующие преимущества:

- полную независимость от внешнего освещения;
- возможность круглосуточного наблюдения;
- высокую контрастность тепловых объектов (с чувствительностью до 30 мК);
- обнаружение объектов через легкие преграды.

Однако данные диапазоны имеют и определенные ограничения: сниженное пространственное разрешение, низкий контраст холодных объектов и, следовательно, сложности точного определения координат тепловых объектов.

Современные двух спектральные матричные приемники позволяют существенно повысить эффективность обнаружения за счет одновременной регистрации в среднем и длинноволновом ИК диапазонах (MWIR/LWIR), компенсируя тем самым недостатки каждого из них в отдельности [2].

Каждые описанные спектральные диапазоны обладают уникальными характеристиками и ограничениями. Видимый диапазон обеспечивает высокое разрешение, но сильно зависит от освещения и ухудшается при плохих атмосферных условиях. SWIR-диапазон менее подвержен атмосферным помехам, позволяет идентифицировать объекты и работать в условиях слабой освещенности, но требует отраженного света. MWIR и LWIR диапазоны обеспечивают всепогодное наблюдение и работу в полной темноте, регистрируют тепловое излучение и эффективны для обнаружения нагретых объектов, однако имеют ограниченное пространственное разрешение и низкий контраст холодных объектов [3].

Именно поэтому многоспектральная регистрация становится незаменимым инструментом современного мониторинга. Комбинируя преимущества разных диапазонов, она компенсирует их недостатки, обеспечивая надежное обнаружение объектов в любых условиях. Такие системы способны одновременно решать задачи детализированного анализа, спектральной идентификации объектов и тепловизионного контроля, что делает их универсальным решением для военных, промышленных и научных применений. Комплексный подход позволяет получить полную информацию об объекте наблюдения независимо от времени суток, погодных условий и степени его маскировки.

Комплексирование изображений представляет собой процесс объединения нескольких снимков с целью получения более информативного результата, чем при анализе отдельных исходных изображений.

Для обеспечения точности привязки координат двух изображений необходимо использование оптической системы, формирующей одноракурсные изображения.

Разрешающая способность МПИ ближнего ИК диапазона в несколько раз выше, чем у МПИ среднего и дальнего диапазонов.

Для комплексирования изображений, полученных в разных диапазонах желательно, чтобы размер пятна рассеяния в изображениях был одинаковым и определялся максимальным размером элемента МПИ среднего и дальнего диапазонов, равным 15 мкм.

В данной работе рассматриваются алгоритмы обработки парных одноракурсных изображений, полученных в широкополосном инфракрасном диапазоне - SWIR (0.9-1.7 мкм) и комбинированном MWIR-LWIR (3-12 мкм) [4].

SWIR диапазон (0.9-1.7 мкм) регистрируется МПИ на основе GaAs, MWIR-LWIR диапазон (3-12 мкм) регистрируется микроболометрической матрицей.

Оптическая система мультиспектральной видеокамеры требует коррекции хроматических аберраций в широком спектральном диапазоне оптической системы 0,9 – 12 мкм.

Использование зеркально-линзовой системы на базе системы Кассегрена [4] облегчает коррекцию хроматизма. Кроме этого, малое зеркало с отрицательной оптической силой используется для разделения SWIR канала и MWIR-LWIR канала, обеспечивая получение одноракурсных изображений.

Оптическая система формирует два независимых изображения объекта наблюдения, регистрируемых различными матричными приемниками излучения. Каждое из них содержит уникальную информацию о пространственном распределении интенсивности излучения в соответствующем спектральном диапазоне. Последующая электронная обработка включает несколько этапов: предварительную нормировку сигналов с учетом различий в чувствительности МПИ, пространственное совмещение кадров и собственно процедуру комплексирования. Яркостная коррекция исходных изображений является обязательным подготовительным этапом, обеспечивающим корректность последующего объединения данных. Выбор конкретного алгоритма комплексирования определяется требуемыми характеристиками результирующего изображения и особенностями решаемой задачи.

1. Методы комплексирования изображений

Основная цель комплексирования - эффективное объединение информативных компонентов изображений разных спектральных диапазонов, обеспечивая быстроедействие для обработки в реальном времени. Исходные изображения, смоделированные в SWIR и MWIR-LWIR диапазонах, представлены на рисунке 3 и рисунке 4 соответственно.



Рисунок 3 – Изображение в SWIR диапазоне



Рисунок 4 – Изображение в MWIR-LWIR диапазоне

На изображении SWIR диапазона нельзя обнаружить объекты из-за густого дыма, но можно четко различить детали фона. На изображении MWIR-LWIR диапазона ситуация обратная: тепловые объекты хорошо различимы, но холодный фон имеет низкий контраст, из-за чего возникает сложность определения координат объектов. В результате комплексирования необходимо получить изображение, на котором тепловые объекты и фон будут одинаково контрастными.

На основании этих критериев в данной работе рассмотрены следующие методы комплексирования изображений:

1.1 Метод максимума и минимума яркости исходных изображений

Метод заключается в формировании нового изображения $I_R(r, c)$, в котором выбираются пиксели с большей яркостью из входных изображений $I_1(r, c)$ и $I_2(r, c)$.

Метод максимума является одним из простейших методов комплексирования и реализуется на основе логической операции сравнения, является неадаптивным и результат полностью зависит от уровня яркости зарегистрированных изображений [5]. Результат комплексирования показан на рисунке 5. Как видно из рисунка, в результате комплексирования была потеряна часть информации изображений.



Рисунок 5 – Комплексированное изображение, полученное методом максимума

Обратный методу максимума – метод минимума. В данном случае значения исходного $I_1(r, c)$ изображения замещаются минимальными значениями второго изображения $I_2(r, c)$. Как и в предыдущем варианте здесь также наблюдается потеря информативной части в результирующем изображении (рисунок 6).



Рисунок 6 – Комплексированное изображение, полученное методом минимума

Оба метода являются ситуативными. Если части наблюдаемых объектов имеют разные яркости в разных спектральных диапазонах, то будет возникать ошибка комплексирования изображений.

1.2 Метод суммирования изображений с весовыми коэффициентами

Метод суммирования заключается в наложении матрицы изображения $I_2(r, c)$ на изображение $I_1(r, c)$ с весовыми коэффициентами α и β , принимающих значения $[0, 1]$. Комплексирование данным методом осуществляется по формуле:

$$I_R(r, c) = \alpha I_1(r, c) + \beta I_2(r, c).$$

Коэффициенты α и β могут быть записаны в форме матрицы, и поэлементное перемножение исходного изображения с такой матрицей создает новое изображение, в котором выделены информативные области. Результирующее изображение имеет сглаженные детали объектов и, соответственно, уменьшенный контраст, относительно

исходных изображений (рисунок 7). Недостатком данного метода заключается в сложности подбора матриц коэффициентов в режиме реального времени.



Рисунок 7 – Комплексированное изображение, полученное методом суммирования с весовыми коэффициентами

1.3 Метод степенного преобразования

Метод степенного преобразования основан на следующей формуле:

$$I_R(r, c) = I_1(r, c)^{1 - \frac{I_2(r, c)}{2^n}}.$$

Исходное изображение $I_1(r, c)$ возводится в степень, равную нормированному значению негатива второго изображения $I_2(r, c)$, где n - разрядность исходного изображения $I_2(r, c)$. И, в результате, показатель степени будет принимать значения в диапазоне $[0;1]$. В результате на комплексированном изображении минимальные значения яркости изображения $I_2(r, c)$ останутся прежними, а для максимальных произойдет изменение. Таким образом, узкий диапазон значений исходного изображения $I_1(r, c)$ преобразуется в широкий диапазон выходных значений, что дает улучшение контраста на результирующем изображении $I_R(r, c)$ [5]. Данный метод является наиболее информативным и сохраняет контрастные признаки как первого, так и второго изображений (рисунок 8).



Рисунок 8 – Комплексированное изображение, полученное методом степенного преобразования

Заключение

В работе были рассмотрены принципы формирования комплексированного изображения в многоспектральной оптико-электронной системе.

Для сравнительного анализа методов комплексирования изображений были использованы два изображения, зарегистрированные в SWIR и MWIR-LWIR диапазонах.

Получены комплексированные изображения из двух изображений разных диапазонов при использовании трех алгоритмов обработки - метода максимума и минимума яркости исходных изображений, метода суммирования изображений с весовыми коэффициентами и метода степенного преобразования одного из изображений.

Результаты исследований показали, что по субъективным и объективным критериям оценки качества изображения, метод степенного преобразования обладает лучшими характеристиками.

Литература

1. Гаршин, А. С. Исследование и разработка многоспектральных оптических систем с одновременной работой каналов: специальность 05.11.07 "Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Гаршин Алексей Сергеевич, 2016. – 150 с.
2. Сконников, П. Н. Алгоритмы комплексирования изображений различных спектральных диапазонов в телевизионных системах улучшенного видения для поисково-спасательных работ: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Рязань, 2022. – 162 с.
3. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. Теория оптических систем. М.: Машиностроение. 1992. 448с.
4. Нога А.Р. Тимашова Л.Н. Синтез двухспектрозональной видеокамеры на основе зеркального телеобъектива // Контенант. 2024. Т. 23, № 1. С. 23-29.
5. Васильев, А. С. Методы комплексирования изображений в многоспектральных оптико-электронных системах // Графикон. 2016. С. 314-318.

ПОДВОДНЫЕ ВИДЕОКАМЕРЫ ДЛЯ РЫБАЛКИ

Волков В.Г.^{1*}, Гиндин П.Д.¹, Карпов В.В.¹, Кузнецов С.А.¹, Сеник Б.Н.^{2**}

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

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

Аннотация: Рассматриваются подводные видеокамеры для рыбалки. Приведены основные параметры подводных видеокамер, внешний вид, оценены их возможности, показан характер изображения.

Ключевые слова: подводная видеокамера, разрешение, глубина погружения, угол обзора, стабилизация, объем памяти, диапазон рабочих температур, масса, габариты.

UNDERWATER VIDEO CAMERAS FOR FISHING

Volkov V.G.^{1*}, Gindin P.D.¹, Karpov V.V.¹, Kuznetsov S.A.¹, Sennik B.N.^{2**}

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

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

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

Abstract: Underwater video cameras for fishing are considered. The main parameters of underwater video cameras, their appearance, their capabilities are evaluated, and the nature of the image is shown.

Keywords: underwater video camera, resolution, diving depth, viewing angle, stabilization, memory capacity, operating temperature range, weight, dimensions.

Общие соображения при выборе видеокамеры для подводной рыбалки

Прежде всего следует уяснить разницу между подводной видеокамерой и эхолотом [1]. Эхолот работает в ультразвуковом диапазоне длин волн и в первую

очередь, предназначен для определения глубины водоема, изучения структуры и рельефа дна. На экране эхолота отображается графическое изображение в виде контуров дна и условные изображения рыб, которые попали в зону действия луча эхолота. Эхолот позволяет: определить глубину на месте ловли, изучить общий рельеф дна, обнаружить наличие на дне бровок, впадин, гребней, обнаружить большие скопления малька и мелкой рыбы, служащих кормовым объектом для хищников, обнаружить стоянку крупной рыбы. Подводная видеокамера позволяет посмотреть на происходящее под водой как будто своими глазами, позволяет наблюдать в режиме реального времени. Подводная камера и эхолот дополняют возможности друг друга. Сравнение изображений с экрана ТВ монитора эхолота (слева) и ТВ монитора видеокамеры (справа) представлено на рис.1 [1]. Целью применения и эхолота, и подводной видеокамеры для рыбалки является обнаружение в толще воды скопления рыбы, изучение рельефа дна, выбор наиболее благоприятного для ловли участка водоема. Использование эхолота позволяет наблюдать лишь различные символы, дуги и кривые линии, позволяющие только догадываться о виде находящейся в зоне действия датчика рыбы. Видеокамера же четко показывает своему владельцу, какая именно добыча проплывает мимо [6].

Подводная видеокамера особенно удобна при ловле рыбы зимой со льда. Рыболов, пробурив лунку, опускает камеру под воду и определяет есть ли рыба на данном участке водоема. Подводная видеокамера для зимней рыбалки должна иметь небольшие габариты, чтобы можно было опускать ее в лунку даже небольшого диаметра, Видеокамера, монитор, кабель, соединяющий камеру с ТВ монитором, должны быть устойчивы к воздействию низких отрицательных температур, аккумулятор видеокамеры для зимней рыбалки должен иметь высокую емкость для работы камеры в течение многих часов [1 - 14]. Видеокамера для подводной съемки и зимней рыбалки позволяет: 1) точно знать, есть ли рыба, и видеть ее; 2) выбирать нужную глубину; 2) наблюдать реакцию рыбы на ту или иную приманку; 3) смотреть за игрой приманки, изменяя стратегию для большего эффекта; 4) понимать активность рыбы, изучив показания специального градусника, который отображает температуру воды; 5) видеть момент, когда нужно подсекать 6) записать увлекательный процесс ловли [6].

Устройство подводной видеокамеры и ее возможности

При своей функциональности подводная видеокамера отличается простой конструкцией. Её основные элементы – это объектив в водонепроницаемом корпусе, инфракрасная (ИК) подсветка, кабель и монитор. Некоторые модели дополнительно оснащены датчиками температуры, глубины, направления объектив и другими. Объектив снимает всё, что происходит под водой, а изображение передаётся по кабелю на ТВ монитор. Наблюдение ведётся в режиме реального времени. Видеокамеры используются на любых водоёмах. Длина кабеля может достигать 15 - 30 м, этого достаточно даже для глубоких озёр и ям на крупных реках. При этом провод не путается, так как наматывается на катушку. Благодаря ей видеокамеру удобно опускать и поднимать на нужную глубину. Под лёд и на глубину солнечные лучи не пробиваются. Поэтому требуется ИК подсветка. Она не распугивает рыбу и обеспечивает полноценное освещение, гарантируя высокое качество изображения. В большинстве моделей предусмотрено два режима съёмки: цветной и монохромный. Лучше та видеокамера, которая автоматически переходит в черно-белый режим в условиях недостаточной видимости. Тогда не придётся тратить время на настройку. Особенно полезна видеокамера в зимние месяцы, когда водоёмы покрыты льдом [2]. Дадим классификацию подводных видеокамер [2].

По типу связи подводные видеокамеры для зимней рыбалки могут быть проводными и беспроводными. В тех и других блок с камерой опускают в лунку при помощи провода. Но если у проводных моделей он используется еще и как средство связи, то беспроводной видеокамерой управляют по идущему в комплекте модулю Wi-Fi. Наличие беспроводной связи избавляет от необходимости носить с собой громоздкий ТВ монитор, т.к. вместо него можно использовать свой смартфон. Проводные видеокамеры - классические модели. Информацию на ТВ монитор они передают с помощью прочного кабеля. Длина кабеля может быть 55 – 30 м. Беспроводные видеокамеры используются «на заброс». Беспроводная сеть - в большинстве случаев это WI-FI [3].

По размеру: компактные и большие видеокамеры. Меньшие размеры и масса имеют беспроводные гаджеты, подключаемые к смартфонам. Например, блок видеокамеры SITITEK VSH 4 весит всего 2 г. Компактные проводные гаджеты идут с небольшим ТВ монитором (сравним по размеру с пластиковой картой), блоком видеокамеры, проводом и аккумулятором [3]. Большие видеокамеры снабжены

крупными ТВ мониторами, громоздкими аккумуляторами и объемными кейсами. В некоторых моделях дополнительно присутствуют эхолоты, GPS-навигаторы и др., что делает их громоздкими. Они хороши высоким качеством видео и многообразием функций, но из-за массы в несколько килограммов тяжелы в переноске [3].

По температурному режиму: зимние, летние или универсальные. Зимние модели работают и сохраняют четкость картинки даже при крепком морозе. Их снабжают емкими аккумуляторами и утепленными чехлами. Универсальные модели работают и зимой, но лишь в рамках рабочих температур. Съемка зимой затруднена наличием толстого ледяного и снежного покровов и сниженным освещением. Это означает, что многие видеокамеры для подледной рыбалки помогут лишь рассмотреть косяк рыб на небольшом расстоянии, ни никак не обеспечить завораживающую видеосъемку, как в красочном фильме [3].

По морозостойкости [12]: Базовые модели работают до $(-10)^{\circ}\text{C}$ (для относительно теплой зимней погоды); Камеры среднего класса рассчитаны на работу до $(-20)^{\circ}\text{C}$ (для большинства зимних условий); Профессиональные устройства можно эксплуатировать при температурном режиме до $(-30)^{\circ}\text{C}$ и ниже (для экстремальных условий).

Подводная видеокамера позволяет рыбаку узнавать о присутствии или отсутствии рыбы на том или ином участке водоема; правильно выбирать наиболее подходящую для ловли рыбы глубину; следить за реакцией рыбы на различные приманки; контролировать игру приманки, рассматривать ее эффективность, при необходимости менять стратегию лова; выяснить особенности рельефа дна; определять активность рыбы с помощью наблюдений за показателями опущенного в воду термометра; ловить максимально подходящие для подсечки моменты; производить видеосъемку рыбной ловли, не отвлекаясь на настройку и установку обычной видеокамеры [6]. Применение такого прибора позволяет узнавать о наличии рыбы на определенном месте водоема. С видеокамерой можно получить точные сведения о состоянии водоема, глубине дна, количестве подводной растительности, что в свою очередь позволит выбрать правильные приемы рыбной ловли. Устройство открывает возможность следить за поведением разных видов рыбы, их реакцию на различные виды наживок и приманок. Видеокамера позволяет полностью контролировать стратегию ловли, контролируя ее в зависимости от ситуации. Применение электроники помогает проследить активность рыбы внутри водоема. Приняв во внимание все эти возможности, можно сделать вывод, что подводная видеокамера значительно

расширяет горизонты рыбной ловли. Только это современное устройство непременно поможет рыболову отыскать в толще воды трофейный экземпляр и вести прицельную охоту именно на него. Рассмотрим основные части подводных видеокамер [4]:

Объектив. Он помещен в водонепроницаемый корпус литого типа. Такая конструкция позволяет не только передавать изображение на поверхность, но и уберегает устройство от большого давления, которое начинается уже с глубины 3- 5 метров.

Кабель. Он выполняет сразу две функции. Во-первых, по нему идет передача изображения. Во-вторых, он служит своеобразной «веревкой», за которую поднимают и опускают камеру.

Дисплей (ТВ монитор). На его экране человек видит основные события, которые происходят на дне водоема. Большинство моделей оборудованы небольшим козырьком. Он защищает хрупкий экран от воздействия ультрафиолета и прочих неблагоприятных факторов внешней среды. В роли ТВ монитора может служить экран телефона или планшета. Такие камеры беспроводные.

Экшн камера используется во время подводной охоты. Отличается тем, что не боится влаги. Передача изображения производится с помощью сети Wi-Fi.

Подсветка. В реках и озерах в воде часто плавают своеобразная «взвесь» (мелкие частицы песка, ила и пр.). Они затрудняют видимость. Без подсветки уже на глубине 1,5 - 2 м человек будет видеть черное пятно на своем ТВ мониторе, т.к. солнечные лучи туда не пробиваются.

Для **хранения** видеокамеры при транспортировке у большинства моделей есть упаковочный кейс для защиты от механических повреждений и атмосферных осадков. Важны следующие параметры видеокамер [4].

Габариты. Видеокамера не должна быть большой. В противном случае ее сложно будет перевозить. Да и при погружении она может зацепиться за то или иное подводное препятствие.

Прочность. Видеокамера должна выдерживать удары без вреда для своих эксплуатационных качеств.

Автономность. Достигается благодаря установке мощных аккумуляторов.

По способу рыболовства.

С лодки. Такие устройства в основном опускаются на проводе.

С берега. Видеокамеры подобного вида «закидываю» на леске или других прочных материалах. Они позволяют обнаружить рыбу за несколько десятков метров

от места ловли. Главное требование к таким конструкциям – их прочность, т.к. в момент удара об воду возникают большие механические нагрузки.

Компактные мини. Это небольшие видеокамеры. Их можно использовать как на летней, так и на зимней рыбалке

Большие. Более разнообразная категория для любительской или профессиональной съемки [4].

Использовать подводную видеокамеру для рыбалки можно на любой глубине как в пресной, так и соленой воде. На большой глубине погружения предусмотрен ИК подсвет, который поможет рассмотреть рыбу даже в мутной воде. Некоторые модели подводных видеокамер в условиях плохой видимости могут автоматически переключаться с цветного экрана на черно-белый [7].

Разрешение и размеры ТВ монитора подводной камеры

Самые важные параметры ТВ монитора: величина его диагонали и разрешение. ТВ монитор должен обладать достаточной прочностью к падению и ударам, быть водонепроницаемым и не бояться резких перепадов температуры. При установке ТВ монитора на спиннинг или удочку оптимальным размер диагонали 3,5 дюйма, в остальных случаях желателен ТВ монитор с большей диагональю [1]. Для летней рыбалки лучше камеры с максимальным разрешением. Это позволит увидеть рыбу сквозь донную взвесь [4].

Размеры, разрешение и чувствительность матрицы видеокамеры

Фотоприемная матрица ПЗС видеокамеры представляет собой микросхему, состоящую из фотодиодов, оптическое изображение проецируется на матрицу и преобразуется в электрические импульсы. Чем больше размер матрицы и больше ее разрешение, тем лучше изображение на ТВ мониторе. Размер матрицы измеряется в дюймах по диагонали. Современные видеокамеры чаще всего используют следующие типоразмеры: 1/2"; 1/3"; 1/4"; 1/6" и 1/10" [1, 4]. Чем больше размер матрицы, тем лучше качество изображения. Более крупная матрица имеет более крупные размеры каждого пикселя, которые улавливают большее количество света. Более крупная матрица, за счет менее густо расположенных пикселей, обеспечивает меньший уровень помех, наводок и паразитных шумов. Более крупные матрицы дают большие углы обзора для оптики с одинаковым фокусным расстоянием. Размеры и разрешение

матрицы особенно важны летом при цветении воды, из-за чего сильно уменьшается ее прозрачность [1].

Качество картинки

Оно зависит от возможностей видеокамеры и ТВ монитора. Чаще всего под водой используют аналоговые камеры из-за их низкого потребления энергии. Их основные параметры — чувствительность (лк) и разрешение (ТВ линий). Например, разрешение популярной видеокамеры «Язь-52» составляет 1000 ТВ линий, а светочувствительность 0,001 лк, у модели SITITEK FishCam-700 разрешение 800 ТВ линий, у FishCam-1000 ТВЛ — 1000 ТВ линий [3].

ИК подсветка камеры

ИК светодиодная (СД) подсветка обеспечивает видимость в темное время суток и на большой глубине. ИК подсветка может включается вручную или автоматически. Лучше выбирать видеокамеру с регулировкой подсветки [1]. Варианты комплектации СД подсветки [12]: 4-8 СД – базовая комплектация для работы в чистой воде; 8 - 12 СД – оптимальный вариант для большинства условий; 12 и более СД – профессиональное решение для работы в мутной воде и на большой глубине. При подсветке в чистой воде свет проникает на несколько метров, тогда как в мутной или богатой планктоном воде дальность освещения может сократиться до 1 м. Поэтому при выборе видеокамеры стоит учитывать условия местных водоемов [12].

Если рыбачить в солнечный зимний день в прозрачной воде, естественного освещения хватит для обзора при наблюдении в видеокамеру на расстоянии нескольких метров. Однако, при наличии плотного снега, на льду, в мутной воде и в сумерках ситуация ухудшается. Исправить ее помогает ИК СД подсветка. Она не отпугивает рыб, создает черно-белую или цветную картинку. Чем больше СД, тем мощнее подсветка. Лучше модель с автоматическим или ручным отключением подсветки, так как в мутных водоемах она приводит к многочисленным бликам от плавающих в воде частиц [3].

Угол обзора камеры

Угол обзора определяет видимый охват наблюдаемого пространства. Чем больше угол обзора, тем шире зона наблюдения. С увеличением угла обзора

ухудшается качество изображения. Лучше всего выбирать камеры со средним значением угла обзора. У большинства подводных камер для рыбалки угол обзора составляет от 90° до 150° [1]. В модели SITITEK FishCam-360 камера имеет круговой обзор (вращается вдоль своей оси при помощи пульта управления) до 360°. Возможна съемка под водой двумя камерами с малыми углами обзора [3].

Максимальная глубина

Подводные камеры имеют кабель длиной от 15 м до 30 м [1].

Рабочий температурный диапазон

Камера должна выдерживать низкие температуры, не только под водой, но и на воздухе. Большинство подводных камер могут работать при температурах от (-20) – (+60)°С [1]. Важным параметром видеокамеры является время ее работы от аккумулятора. Время работы видеокамеры указывается в часах. Чем больше емкость аккумулятора, тем дольше может работать видеокамера. Зимой время работы видеокамеры от аккумулятора сильно сокращается. Важны параметры аккумулятора: напряжение, ток, емкость, возможность замены при выходе из строя [1].

Дополнительные функции и опции

К ним относится функция энергосбережения в ТВ мониторе для экономии заряд аккумулятора. Видеокамеры комплектуются зарядным устройством, от розетки с напряжением ~220 В, или от прикуривателя автомобиля. Некоторые видеокамеры имеют кронштейны для закрепления их на удильщике и комплектуются ударопрочным кейсом [1].

Видеокамеры для рыбалки с удочкой

Особо следует остановиться на видеокамерах для рыбалки с удочкой [5]. Такая видеокамера служит для наблюдения за поведением рыбы под водой в реальном времени и позволяет выполнять более своевременные подсечки, делать выводы о закономерностях хватки рыбой приманки при определенных условиях (освещенности, скорости проводки, цвете приманки). Комплект видеокамеры содержит электронный блок с ТВ монитором; шнур; видеокамеру; поплавки; дополнительные аксессуары. Для

заброса и подмотки снасти служит удилище с катушкой. Бланк — центральная часть удилища, представляющая собой длинный и гибкий стержень. Материалы, для изготовления бланка спиннинга, могут включать в себя углеволокно, стекловолокно или их сочетания. Углеволокно обеспечивает малую массу и высокую чувствительность, что делает спиннинг более реактивным на поклевку рыбы. Стекловолокно же придает спиннингу большую прочность и гибкость. Бланк — сама «палка» удилища, на которой установлены катушка, конечная оснастка, кольца. Размер ТВ монитора по диагонали — от 3,2 до 4,3 дюймов. Оптимальный размер — 3,5 дюймов [11]. Электронный блок с ТВ монитором включает в себя кнопки включения/выключения прибора, входа и навигации по различным пунктам меню, записи видео на встроенную память, включения ИК подсветки. Батарея — литиевая емкостью от 2000 до 4000 мАч на 5 — 7 часов непрерывной работы. Память — от 8 до 32 Гб. Материал корпуса — легкие и прочные сплавы, покрытые устойчивой к коррозии краской. Температурный рабочий диапазон — (-20) — (+60)°C. Для защиты от бликов и яркого света ТВ монитор оснащают специальной солнцезащитной крышкой. Электронный блок соединяется с подводной видеокамерой при помощи гибкого и прочного шнура диаметром 1,0 мм, способным выдерживать массу до 10 — 20 кг. В различных моделях длина шнура может составлять 15, 20, 25 и 30 м. Для его намотки применяют специальную пластиковую бобину. На шнуре установлен специальный яркий пластиковый поплавок шарообразной или каплевидной формы [5]. Видеокамера обычно имеет следующие параметры [5]: масса — 12 — 13 г, разрешение — 0,3 — 1,0 Мп, угол обзора — до 135°. Для ИК подсветки камера оснащена 8 — 12 ИК СД для съемки в условиях слабой освещенности. Стандартная подводная камера на удочку оснащается 3-кратным цифровым зумом. Для заброса и проводки оснастки при отсутствии в комплекте поставки с видеокамерой применяют бланки, имеющие такие характеристики как [5]: длина — от 0,9 до 2,1 м, тест — 20–30 г, строй — быстрый или сверхбыстрый (жесткий бланк, не изгибающийся под нагрузкой), материал — стекловолокно. Для заброса подобной снасти подойдут простые и недорогие бланки с надежной рукоятью, прочным и жестким хлыстом. В качестве катушки могут применяться как безынерционные (размером 3000 — 4000 мм), так и инерционные модели. В комплект поставки могут входить устройства для зарядки электронного блока — от стационарной сети и автомобильной. Кабель USB служит для копирования снятого видео и фото из памяти прибора на жесткий диск компьютера, планшета.

Проволочные центральные кольца обеспечивают крепление видеокамеры с находящейся за ней оснасткой. [5].

Внешний вид изображения в подводные видеокамеры и в эхолот для рыбалки представлены на рисунке 1.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 1 – Изображения, наблюдаемые в подводную видеокамеру: *а* – сравнение изображений с экрана эхолота и с экрана ТВ монитора видеокамеры; *б* – от видеокамеры для рыбалки; *в* – характер наблюдения через подводную видеокамеру; *г* – съемки подводного мира через видеокамеру для рыбалки

Описание типичных подводных видеокамер для рыбалки представлены в источниках [7 – 16]. Внешний вид видеоудочек представлен на рисунке 2.



а)



б)



в)



г)



д)



е)

Рисунок 2 – Видеоудочки: а – «Налим» с функцией записи AVT 998 НВ; б – удилице для ТВ монитора видеокамеры; в – удилице для рыбалки на дне водоема, г – подводная видеокамера на удилице с увеличенным углом обзора; д – подводная видеокамера с удилицем под ТВ монитор; е – видеоудочка AVT 88X3

На рисунке 3 показано устройство и работа подводных видеокамер.



а)



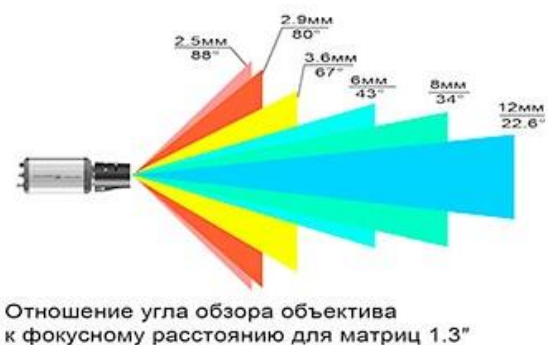
б)



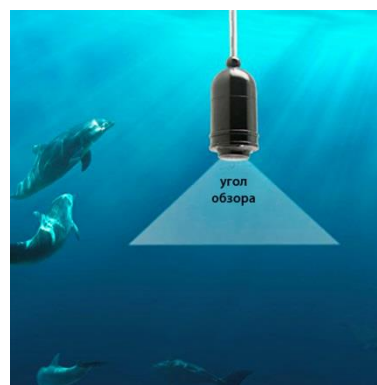
в)



г)



д)



е)

Рисунок 3 – Устройство и работа подводных видеокамер: а – как работает видеокамера для рыбалки; б – работа подводной камеры для рыбалки AVT miniDR; в – устройство подводной камеры для рыбалки; г – ТВ монитор для подводной камеры Еуоуо для летней и зимней рыбалки; д – определение угла обзора и фокусного расстояния объектива для матрицы 1/3 дюйма; е – угол обзора для подводной рыбалки

На рисунке 4 показан внешний вид СД подсветки.



а)



б)

Рисунок 4 – СД подсветки для подводных видеокамер: а – ИК, б – белая

На рисунках 5,6 показаны типичные видеокамеры для подводной рыбалки.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 5 – Внешний вид подводных видеокамер для рыбалки: а – CALIPSO PDV-1110; б – CALIPSO UVS-03; в - AVT 997L; г – LUCKY-FL180AR



а)



б)



в)



г)



д)



е)

Рисунок 6 – Внешний вид подводных видеокамер для рыбалки: а – Язь-52 Актив 7 дюймов (+ DVR); б – Focus Fish 7 дюймов; в – для зимней и летней рыбалки Erhang F431-B; г – SONY IMX225; д – Барракуда 4.3; е – для зимней и летней рыбалки Thrjles

Основные подводных ТВ камер для рыбалки представлены в таблицах 1, 2, а параметры СД подсветки – в таблице 3.

Т а б л и ц а 1 – Основные параметры подводных видеокамер для рыбной ловли (по данным проспектов фирм)

№ п/п	Страна/модель	Разрешение, пиксели	Диагональ экрана ТВ монитора, дюймы	Угол обзора, град.	Подсветка	$\Delta t_{\text{раб}}, ^\circ\text{C}$	T_n , час	Длина кабеля, м	Класс защиты	Масса, кг/габариты, мм	Примечания
1	РФ/Фишка 903	800x480	9	140	Настраиваемая AVT	-20..+60	12	15			
2	РФ/AVT ALL- ROUND-R50	860x480	5	360	Настраиваемая	-20..+40	4	50			
3	РФ/Язь-52 Компакт	1024x768	9	92	12 ИК СД	-25..+60	6	15		2,35/270x 230x130	Рабочая освещенность $2 \times 10^{-3} - 2 \times 10^{-4}$ лк
4	РФ/Язь-52 Актив 7	1024x768	9			-25..+60	6	15		0,4/170x 110x65	
5	РФ/Фишка 430	480x272	4,3	150	8 ИК СД	-20..+60		15		0,187/118 x90x20	Рабочая освещен- ность $2 \times 10^{-3} -$ 2×10^{-4} лк

№ п/п	Страна/модель	Разрешение, пиксели	Диагональ экрана ТВ монитора, дюймы	Угол обзора, град.	Подсветка	$\Delta t_{\text{раб}}, ^\circ\text{C}$	T_n , час	Длина кабеля, м	Класс защиты	Масса, кг/габариты, мм	Примечания
6	РФ/Фишка 703	1280x960	7	140	Комбинированная (12 ИК и 12 белых СД)	-20...+60	12	15			
7	РФ/Lucky Spy 180 PR	320x240	4,3	125	ИК СД	-20...+50		20		0,9/200x110x225	Память 8 Гб
8	РФ/Вятка Fish 3 контакт	420x240	5	90	Настраиваемая 4 ИК СД	-30...+70	8	20			
9	Китай/EGP PRO 7L15	960x480	7	120	Многофункциональная	-20...+60	10	15	IP68	3/110x240x140	Корпус – АБС пластик, дисплей - вакуумный
10	Китай/Lucky FF3308-8	628x526	3,5	120	Постоянная	-20...+60	3	20			
11	Китай/ Lucky Otter FF3309 WiFi	720x280	4,3	120	Настраиваемая 4 ИК СД	-20...+70	6	20		0,855/250x200x250	Питание 5 В 1 А

№ п/п	Страна/модель	Разрешение, пиксели	Диагональ экрана ТВ монитора, дюймы	Угол обзора, град.	Подсветка	$\Delta t_{\text{раб}}, ^\circ\text{C}$	T_n , час	Длина кабеля, м	Класс защиты	Масса, кг/габариты, мм	Примечания
12	Китай/Erchang R68	592x420	7	180	Настраиваемая	-10..+50	12	15			Видно в глубину на 40 м, в стороны на 200 м
13	Китай/Ehno PB 30 м 1000 ТВЛ	720x480	4,3	145	Настраиваемая, адаптивная	-20..+60	6	20			
14	Китай/SITTEK Fish Cam-501	480x320	3,5	220	Регулируемая 18 СД	-20..+60	7	15			
15	Китай/Zhangyifan	1280x720		220	Постоянная	-20..+60	4	20			
16	Китай/Lucky Underwater Camera Spy FL 180 PR	320x240	4,3	120	Настраиваемая	-20..+40	4	20			
17	Китай/Vieweye	480x272	4,3	120	Настраиваемая	-20..+60	4	25	IP68	-/Ø21x32	
18	Китай/Rivetech C5 с компасом	720x480	5	130	СД: 2 белых, 4 ИК	-20..+60	6	15	IP68	0,675/70x155x109	Память 128 Гб

№ п/п	Страна/модель	Разрешение, пиксели	Диагональ экрана ТВ монитора, дюймы	Угол обзора, град.	Подсветка	$\Delta t_{\text{раб}}, ^\circ\text{C}$	T_n , час	Длина кабеля, м	Класс защиты	Масса, кг/габариты, мм	Примечания
19	Китай/Murena Mini	480x272	4,3	110	2 ИК СД	-20..+60	10	20	IP68	0,25/-	Питание 12 В
20	Китай/с визуальным эхолотом	480x272	4,3	220	ИК	-20..+60	6-8	15	IP68		
21	Китай/Euoyo	480x272	4,3	120	ИК	-35..+45		15	IP68	0,38/93x 60x130	
22	Китай/Thejles	480x272	4,3	120	8 ИК СД	-20..+60	6-7	25	IP68	-/Ø32x21	Питание 9 В
23	Китай/CARCAM FISHING CAMERA FC-009 SH	960x480	7	160	12 ИК СД	-20..+60	8	15	IP68	-/240x 210x140	
24	Китай/Подводная ТВ камера для рыбалки 20 м	480x272	4,3	120	8 ИК СД	-40..+50	5-6	20		0,375/-	
25	Китай/EGO PRO ESCALIBR4SSE 15	960x480	4,3	120	8 ИК СД	-20..+60	8	15	IP68	0,32/134x 92x28	Питание 3,7 В
26	Китай/Баракуdda	320x240	4,3	150	4 ИК СД	-20..+60	7-8	20			

№ п/п	Страна/модель	Разрешение, пиксели	Диагональ экрана ТВ монитора, дюймы	Угол обзора, град.	Подсветка	$\Delta t_{\text{раб}}, ^\circ\text{C}$	T_n , час	Длина кабеля, м	Класс защиты	Масса, кг/габариты, мм	Примечания
27	Китай/ECKEN H9R Ultra HD	3840x2160		170	4 ИК СД	-20...+60		30		0,064/41x59x25	Память 64 Гб
28	Китай/Power Vision Power Ray Wizard	3840x2160		95		0...+40		30		3,8/465x270x126	Есть гидролокатор, дальность управления 90 м
29	Китай/CALIPSO UVS-04	960x480	4,3	120		-20...+50			IP68	0,38/139x101x200	Память 8 Гб
30	Китай/WiFi Action Sport Camera	5201x4096		170		-20...+60		30	IP68	0,083/59x25x41	
31	Китай/PRO Ever Capitain CAM 7	1024x768	7	120	13 СД белого цвета, 15 ИК СД	-20...+60		30	IP68	0,39/-	
32	Китай/RIXET FF3	1000 ТВ линий	7	92	12 ИК СД	-20...+60		30		1,6/Ø38,5x89	

№ п/п	Страна/модель	Разрешение, пиксели	Диагональ экрана ТВ монитора, дюймы	Угол обзора, град.	Подсветка	$\Delta t_{\text{раб}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{н}},$ час	Длина кабеля, м	Класс защиты	Масса, кг/габариты, мм	Примечания
33	Китай/Profi	960x480, 1000 ТВ линий	7	120		-20..+60					Есть модуль GPS
34	Япония/Sony IMX225	1280x960.	4,3	195	СД	-20..+60	6	15/2 0/ 30	IP68	0,35/150x 30x100	
35	СШ/Mar Cum Technologies	800x480	7	160	Многоканаль- ный адаптивный	-20..+40	4	22	IP68	3/-	

Примечания: Примечания: $\Delta t_{\text{раб}}$ – диапазон рабочих температур, $T_{\text{н}}$ – время непрерывной работы

Таблица 2 – Основные параметры подводных видеокамер для рыбной ловли видео удочкой с креплением ТВ монитора на удочку (по данным проспектов фирм)

№ п/п	Страна/модель	Разрешение, пиксели	Диагональ экрана ТВ монитора, дюймы	Угол обзора, град.	Подсветка	$\Delta t_{\text{раб}}, ^\circ\text{C}$	T_n , час	Длина кабеля, м	Класс защиты	Масса, кг/габариты, мм	Примечания
1	РФ/Focusfish 7	1280x720	7	130	Настраиваемая	-30..+60	8	15			
2	Китай/Fish Cam Plus 750	960x240	4,3	120	Автоматическая	-20..+60	7	15		0,01/Ø31x21 (ТВ камера) 0,375/118x90x20 (ТВ монитор)	
3	РФ/Фишка 503	800x480	4,3	135	Настраиваемая	-20..+60	2	25			
4	Китай/CALIPSO UVS-02	720x480	4,3	120-130	Настраиваемая	-20..+60	8	15	IP67	0,38/139x101x53	Питание 3,7 В
5	РФ/Практик Мурена	720x480	5	130	ИК адаптивная	-20..+60	6	15			
6	Южная Корея/Aqua-Vu micro Revolution Pro 5.0	960x576	5	125	Адаптивная	-20..+60	4	18	IP67	0,012/Ø33x20 (ТВ камера) 0,996/27x75x18 (ТВ монитор)	Яркость изображения 300 кд/м ² , Питание 12 В

№ п/п	Страна/модель	Разрешение, пиксели	Диагональ экрана ТВ монитора, дюймы	Угол обзора, град.	Подсветка	$\Delta t_{\text{раб}}, ^\circ\text{C}$	T_n , час	Длина кабеля, м	Класс защиты	Масса, кг/габариты, мм	Примечания
7	Китай/CALIPSO UVS-03	960x480	4,3	120	Настраиваемая белая	-20..+60	6	20	IP67	0,38/101x39x50 (ТВ монитор)	Яркость изображения 500 кд/м ² , Питание 3,7 В, емкость 32 Гб
8	Китай/Erhang F431- В	1280x720	4,3	130	ИК	-20..+60	10	15		0,63/- (ТВ монитор)	32 Гб
9	Китай/ТВ камера с увеличенным углом обзора	800x480	4,3	220	ИК	-20..+60	8	20			
10	Китай/SITITEK Fish Cam-550 DVR	1000 ТВ линий	5	120	8 ИК СД	-20..+60	6	15		0,01/Ø36x22 (ТВ камера) 0,35/150x105x5 5 (ТВ монитор)	Питание 5 В, ток 2 А, емкость до 128 Гб, видимость в воде 0,2 – 3 м
11	РФ/ AVT 997 НВ	720x480	4,3	170	ИК	-20..+60	8	15		0,822/-	

Примечания: $\Delta t_{\text{раб}}$ – диапазон рабочих температур, T_n – время непрерывной работы

Таблица 3 – Основные параметры подводных осветителей видеокамер для рыбной ловли (по данным проспектов фирм)

№ п/п	Модель	Ф, кд	2ω, град.	U, В	P, Вт	Глубина погруже- ния, м	Тип излуча- теля	Масса, г	Габариты, мм	Класс защи- ты	Примечание
1	СД подводный фонарь для экшнкамеры GoPro Xiaomi	300				30	СД				3 режима работы: max, min, SOS
2	Ferei-W 163 II В 7150 lm	7150 (Т = 3000 – 4500 К)				150	СД, 3 шт.	775	Ø60x140	IP68	3 режима работы: 100%, 50%, стробоскоп, время работы 2 – 42 часа
3	Ferei W156 II XM-12	1000		3,7	12	30	СД CREE T6.202		Ø56x230		4 режима работы: 100%, 50%, 10%, SOS, соответственно первым 3-м режимам освещенность 210 лк, 330 лк, 2000 лк, время работы 3,5 – 16,7 часов
4	Sargan Condor 1000 lm	1900 лк на 0,5 м (Т = 5600±300 К)	55	3,8		20	СД	116	45x45x47	IPX8	4 режима работы: 100%, 50%, 10%, SOS, Δt = (10) – (+40)°С, время работы 1,3 – 5,5 часов

№ п/п	Модель	Φ, кд	2ω, град .	U, В	P, Вт	Глубина погруже- ния, м	Тип излуча теля	Масса, г	Габариты, мм	Класс защи- ты	Примечание
5	LED Godox WL4B	1250 лк на 0,5 м (T = 2700 – 8500 K)		5	10		СД	260	110x57x 32,5		Δt = (10) – (+40)°C
6	LED Godox WL8P		35	24	24	10	СД CREE 6x2 шт.	1000	140x90x 160		
7	925 LED1 (RGB)	925 (T = 4000 K)		24	21	2	СД 18 шт. по 1,5 Вт	8900	200x190x 190		
8	Pondtech 18LED3 (White)	(T = 5600±300 K)		5, 9, 12, 15, 20	24	40	СД 54 шт.	640	57x52x 250		Индекс CRI≥0,6
9	LED Godox Dive Light WT25D	2020 лк на 0,5 м (T = 1800 – 10000 K)		5, 9, 12, 15, 20	20			660			

№ п/п	Модель	Ф, кд	2ω, град	U, В	P, Вт	Глубина погруже- ния, м	Тип излу- ча- теля	Масса, г	Габарит ы, мм	Класс защи- ты	Примечание
10	LED Godox Dive Light WT25R	2000	60			100					4 режима работы: яркость луча высокая, средняя эконо, SOS, освещенность для первых 3-х режимов соответственно 2000 лк, 1000 лк, 500 лк, время работы 0,75 – 3 часа
11	Light and Motion Sola Video 2000F	1000	60			120		178	125x48x 48		
12	Light and Motion Go Be II XM-L2										

Примечания: 2 ω – угол обзора, Т – цветовая температура, U – напряжение питания, Р – мощность, СД – светодиод, Δt – диапазон рабочих температур

Некоторые расчетные данные

Расчет дальности видения в подводные видеокамеры при их работе в пассивном и в активном режиме изложен в работе [15]. При этом следует уточнить некоторые формулы в соответствии с данными работы [16]. Для случая параллельного расположения центральных осей осветителя и видеокамеры формула для силы света осветителя принимает вид:

$$I = E_{\phi} (4 h^2 n^2 e^{h\gamma (\sec \alpha + \sec \beta)} (\tau_o \rho \cos^4 \beta \cos^3 \alpha (D/f)^2 F)^{-1}. \quad (1)$$

Для наклонного расположения осветителя:

$$I = E_{\phi} (4 h^2 n^2 e^{h\gamma (\sec (\alpha + \psi) + \sec \beta)} (\tau_o \rho \cos^4 \beta \cos^3 (\alpha + \psi) (D/f)^2 F)^{-1}, \quad (2)$$

где E_{ϕ} – освещенность фотоприемной матрицы видеокамеры от объекта, м; I – сила света осветителя, кд; h – глубина погружения, м; n – показатель преломления воды; γ – коэффициент вертикального ослабления света в воде; α – горизонтальный угол подсвета, град.; β – вертикальный угол подсвета, град.; ρ – коэффициент яркости объекта; D – диаметр входного зрачка объектива видеокамеры, м; f – фокусное расстояние объектива видеокамеры, м; F – функция, зависящая от относительного размера минимальной детали объекта; ψ – угол наклона осветителя, град.

Результаты расчета дальности видения подводных видеокамер приведены в таблицах 4, 5.

Таблица 4 – Дальность видения в подводные видеокамеры для рыбной ловли

№ п/п	Страна/модель	Дальность видения при работе подводной видеокамеры в пассивном режиме, м.	Дальность видения при работе подводной видеокамеры в активном режиме, м.	№ п/п	Страна/модель	Дальность видения при работе подводной видеокамеры в пассивном режиме, м.	Дальность видения при работе подводной видеокамеры в активном режиме, м.
1	РФ/Фишка 903	1- 3	3	22	Китай/Thejles	2,3	2,5
2	РФ/AVT ALL- ROUND-R50	1,8	1,9	23	Китай/CARCAM FISHING CAMERA FC-009 SH	3	3
3	РФ/Язь-52 Компакт	1,4	1,5	24	Китай/Подводная ТВ камера для рыбалки 20 м	1,7	2
4	РФ/Язь-52 Актив 7	1,5	1,5	25	Китай/EGO PRO ESCALIBR4SSE 15	1,5	1,5
5	РФ/Фишка 430	1 - 3	3	26	Китай/Баракуdda	2	2
6	РФ/Фишка 703	1-3	3	27	Китай/ECKEN H9R Ultra HD	2,8	2,9
7	РФ/Lucky Spy 180 PR	1,9	1,7	28	Китай/Power Vision Power Ray Wizard	2,9	3
8	РФ/Вятка Fish 3 контакт	1,8	1,5	29	Китай/CALIPSO UVS-04	1,5	1,5
9	Китай/EGP PRO 7L15	1,5	1,5	30	Китай/WiFi Action Sport Camera	3	3
10	Китай/Lucky FF3308-8	2	1,8	31	Китай/PRO Ever Capitain CAM 7	3	2,8
11	Китай/ Lucky Otter FF3309 WiFi	1,9	1,7	32	Китай/RIXET FF3	3	3
12	Китай/Erchang R68	1,2	1,4	33	Китай/Profi	3	3,2
13	Китай/Ehno PB 30 м 1000 ТВЛ	2	2	34	Япония/Sony IMX225	1,8	2,2
14	Китай/SITTEK Fish Cam-501	0,2 - 3	3	35	СШ/Mar Cum Technologies	2,1	2,3
15	Китай/Zhangyifan	1,8	2				
16	Китай/Lucky Underwater Camera Spy FL 180 PR	2	1,9				
17	Китай/Vieweye	0,6 - 3	3				
18	Китай/Rivetech C5 с компасом	1,5	1,5				
19	Китай/Murena Mini	2	1,8				
20	Китай/с визуальным эхолотом	1,4	1,5				
21	Китай/Euoyo	1,5	1,5				

Таблица 5 – Дальность видения в подводные видеокамеры для рыбной ловли видео удочкой с креплением ТВ монитора на удочку

№ п/п	Страна/модель	Дальность видения при работе подводной видеокамеры в пассивном режиме, м.	Дальность видения при работе подводной видеокамеры в активном режиме, м.
1	РФ/Focusfish 7	1,5	1,5
2	Китай/Fish Cam Plus 750	0,6	0,8
3	РФ/Фишка 503	1 - 3	3
4	Китай/CALIPSO UVS-02	1,5	1,8
5	РФ/Практик Мурена	1,5	1,6
6	Южная Корея/Aqua-Vu micro Revolution Pro 5.0	1,7	1,8
7	Китай/CALIPSO UVS-03	2	2
8	Китай/Erhang F431-B	1,5	1,5
9	Китай/ТВ камера с увеличенным углом обзора	2	1.9
10	Китай/SITITEK Fish Cam-550 DVR	3	3
11	РФ/ AVT 997 HB	1,5	1,4

Описании некоторых видов видеокамер для рыбалки

Видеокамера для рыбалки Налим (рисунок 2а) имеет небольшие размеры. Ее ТВ монитор крепится на удочку. Подводная камера с цветной матрицей CMOS ¼ дюйма имеет разрешение 1000 ТВ линий, широкий угол обзора 150° и подключается к ТВ монитору (4,3" по диагонали) посредством кабеля длиной 15 м с прочностью на разрыв 30 кг. Фокусное расстояние объектива 3,6 мм, минимальная освещенность 2 лк, дальность видения в чистой воде 1 – 5 м. Есть встроенная ИК-подсветка из 8 СД.

Аккумулятор емкостью 2600 мАч обеспечивает до 7 ч работы. Предусмотрена видеозапись на карту памяти. Напряжение питания камеры 3,7 В, энергопотребление 0,22 – 0,37 Вт. Диапазон рабочих температур (-20) – (+60)°. Габариты камеры Ø34x20 мм, ее масса 12 г. Разрешение ТВ монитора 800x480 пикселей, яркость экрана 350 кд/м², регулируются яркость, контраст, насыщенность цвета, регулировка положения экрана – по вертикали и по горизонтали, напряжение питания 7,4 В, энергопотребление 1,7 Вт (вместе с видеокамерой). Габариты ТВ монитора 118x90x20 мм, масса 175 г [11].

Видеокамера для рыбалки с установкой на удочке ТВ монитора (рисунок 2б) [5] служит для наблюдения за поведением рыбы под водой в реальном времени и позволяет выполнять более своевременные подсечки, делать выводы о закономерностях хватки рыбой приманки при определенных условиях (освещенности, скорости проводки, цвете приманки). Для заброса и подмотки снасти служит удилище с катушкой. Видеокамера имеет массу – 12–13 г, разрешение – 0,3–1,0 Мп. Камера оснащена 8 – 12 ИК СД, Увеличение изображения обеспечивается 3-кратным цифровым зумом. Размер ТВ монитора по диагонали – от 3,2 до 4,3 дюймов. Наилучший вариант – размер по диагонали 3,5 дюймов [11]. Тип экрана – цветной, жидкокристаллический. Электронный блок ТВ монитора включает в себя кнопки включения/выключения, входа и навигации по различным пунктам меню, записи видео на встроенную память, включения ИК подсветки камеры. В электронных блоках подводных видеокамер применяются аккумуляторы емкостью от 2000 до 4000 мА, обеспечивающие 5 – 7 ч работы. Встраиваемая внутренняя память имеет объем от 8 до 32 Гб. Материал корпуса выполнен из легких и прочных сплавов, покрыт устойчивой к коррозии краской. Масса блока – от 150 до 200 г. Температурный диапазон температур от -20 до +60°С.

Видеокамера UVS-02 PLUS от бренда CALYPSO у ТВ монитора имеет козырек, защищающий от солнца. UVS-03 PLUS от CALYPSO имеет функцию «запись». Видеокамера Фишка 703 имеет ТВ монитор с диагональю 7". Видеокамера оснащена 12 ИК СД. Присутствует опция «запись». Видеокамера Mission SD от бренда MARCUM с диагональю 7" оснащена антибликовой технологией SolarIntelligent. Видеокамера VS485с от бренда MARCUM имеет диагональ дисплея 7". Длина кабеля 15 м. Видеокамера Recon 5 Plus от MARCUM имеет дисплей с диагональю 5". Карта памяти на 32 Гб [11].

На рисунке 5а представлена подводная видеокамера CALYPSO FDV-1110 [8]. Корпус выполнен из высокопрочного пластика. Масса объектива, закрепляемого на поплавке, 0,38 г. Нагрузка на разрыв составляет 20 кг. Видеокамера обладает разрешением 720x480 пикселей, а ТВ монитор - 960x480 пикселей. Имеется СД подсветка. Длина кабеля - 20 м. ТВ монитор устойчив к влаге и к запотеванию. Объектив оснащен цифровым зумом с увеличением 4^x. К ТВ монитору можно подключить MicroSD карту для передачи отснятого материала на жесткий диск. Поддерживаются карты памяти объемом до 32 Гб. Температура эксплуатации до (-20)°С. Емкость аккумулятора 4000 мАч. Он обеспечивает до 8 ч работы.

Видеокамера CALYPSO UVS 02 PLUS [8] имеет ТВ монитор которой установлен в прочный пластиковый бокс и имеет диагональ 4.3" с разрешением 960x480 пикселей. Камера имеет разрешение 720x480 пикселей, а также ИК подсветку. Кабель камеры длиной 20 м выдерживает нагрузки до 20 кг. Угол обзора 130°. Видеокамера имеет увеличение 4^x, массу 360 г, способна работать при температурах от (-20) – (+60)°С. Встроенный аккумулятор напряжением 3,7 В с емкостью 4000 мАч, обеспечивает работу 6 ч.

Видеокамера Agua-Vu Micro [8] имеет массу 300 г. Кабель имеет длину 15 м и выдерживает нагрузку на разрыв до 10 кг. Разрешение экрана - 320x240 пикселей. Имеется ИК подсветка и датчик освещенности. Видеокамера работает при температуре до (-22) (-25)°, имеет разрешение 653x490 пикселей. Видеокамера работает на глубине до 15 м.

Видеокамера AVT 997L [8] оснащена широкоугольным (угол обзора 92°) объективом с мощной ИК/белой-подсветкой. Имеются настройки видео изображения (яркость, контрастность, насыщенность), а также функция ее увеличения 3^x. Видеокамера имеет разрешение 1000 ТВ линий. ТВ монитор имеет диагональ 7". Система работает в диапазоне температур (-20°С) - (+60°С). Аккумуляторная батарея емкостью 4500 мА/ч обеспечивает работу до 6 ч. Кабель имеет длину 15 м.

На рисунке 5г представлена подводная видеокамера LUCKY FL 180 AR [10]. Видеокамеру можно установить на удочку с помощью специального кронштейна, а широкий угол обзора объектива поможет разглядеть рельеф дна и рыбу на глубине до 20 м. Видеокамера имеет ИК подсветку, может работать при температуре до (-30)°С. Предусмотрена функции записи (DVR).

Видеокамера EYEYO 1000TVL 15 м (без DVR) [10] имеет разрешение 1000 ТВ линий. На видеокамере есть 12 ИК СД. Диагональ ТВ монитора 7 дюймов.

Предусмотрены катушки, позволяющие закрепить кабель видеокамеры на фидере и опускать в воду на летней рыбалке. Кабель длиной 15 м выдерживает нагрузку до 30 кг и резкие перепады температур. Время непрерывной работы камеры до 8 ч.

На рисунке 6а представлена подводная видеокамера Язь-52 АКТИВ 7 дюймов (+DVR).[10]. В комплектах Язь-52 используются видеокамеры AHD-Sony с технологией Starvis, при этом новая матрица выполнена по технологии CMOS с обратной засветкой, что обеспечивает работу ночью. Вся электроника и литий-ионная батарея размещены внутри влагозащищенного корпуса, а на сам корпус укладывается высокопрочный морозоустойчивый кабель с видеокамерой. Имеется функция видеозаписи. Аккумуляторная батарея емкостью 4500 мА/ч обеспечивает работу до 5 ч при температурах (-20) – (+60)°С. Заполненный кейс имеет габариты 170 x 101 x 65 мм, массу - 0,9 кг. Диагональ ТВ монитора 7 дюймов. Длина кабеля 15 м.

Видеокамера Язь-52 Компакт 9 дюймов (PRO (+DVR) [10] имеет ТВ монитор с антибликовым покрытием. Корпус видеокамеры состоит из 2-х слоев: внутренний корпус - алюминиевый, наружный - пластиковый. Особая форма корпуса видеокамеры защищает кабель в месте соединения с видеокамерой, улучшает обтекаемость видеокамеры и повышает ее устойчивость. На корпусе видеокамеры предусмотрено место для крепления груза массой до 200 г.

Видеокамера CALYPSO UVS-03 Plus (рисунок 5б) имеет СД подсветку. Имеются функции фото- и видеозаписи, а также зум с увеличением 4^x. [12]. Класс защиты от влаги - IP68, работоспособность - при температурах до (-20)°С. Кабель имеет прочность на разрыв до 25 кг. Габариты - 139×101×53 мм, масса 380 г. Время работы 6 ч [12].

Видеокамера "МУРЕНА" имеет датчик глубины и температуры воды, а также встроенный компас [12]. Имеется комбинированная подсветка (2 белых и 4 ИК СД). Угол обзора 130° [12].

Подводная видеокамера Rivertech C5 TONAR производителей Rivertech и Tonar, имеет встроенный компас для точного определения направления обзора видеокамеры и датчик температуры воды. Видеокамера оснащена комбинированной подсветкой (2 белых и 4 ИК СД) [12]. Широкий угол обзора в 130° обеспечивает вертикальную и горизонтальную съемки. Видеокамера имеет мощный аккумулятор емкостью 10000 мАч, степень защиты IP68 и кабель длиной 15 м. Имеется 5-дюймовый экран с солнцезащитным козырьком и индикатором заряда [12]. В комплект видеокамеры входит SD-карта на 8 Гб, и крепления для удочки и руки [12].

Подводная видеокамера Custo Plus имеет сверхширокий угол обзора 180° в сочетании с 6-кратным зумом. Видеокамера оснащена 8 ИК СД для освещения в условиях слабой видимости под льдом [12]. Мощный аккумулятор емкостью 10000 мАч обеспечивает до 10 ч часов работы при температурах до (-20)°С. Высокая степень защиты IP68 и прочный кабель с разрывной нагрузкой до 25 кг гарантируют надежность в сложных условиях. В комплекте есть карта памяти на 8 Гб и подвес для ориентации видеокамеры [12].

Подводная видеокамера FocusFish (рисунок 6б) имеет повышенную морозостойкость при низких температурах до (-60)°С. Есть два типа регулируемой подсветки (ИК и СД) [12]. ТВ монитор имеет влагозащищенный корпус и ударопрочную крышку-козырек для защиты от осадков и бликов. Система питания имеет два аккумулятора на 6 ч работы и дополнительный морозостойкий аккумулятор на 5 ч работы. Имеется карта памяти на 64 Гб и держатель для лунки [12].

Подводная видеокамера Gold Fish Pro снабжена комбинированной СД и ИК подсветкой [12], имеет класс защиты IP68. Имеется 7-дюймовый TFT ТВ монитор с антибликовым козырьком. Время автономной работы – до 8 ч [12].

Подводная видеокамера FishCam Plus 750 имеет высокое разрешение 1000 ТВ линий (1,92 Мп) в сочетании с широким углом обзора 120° и автоматической ИК подсветкой из 8 СД. Видеокамера может работать как в вертикальном положении для наблюдения за наживкой, так и в горизонтальном для обзора пространства [12]. Кабель выдерживает нагрузку до 30 кг. Видеокамера может работать при температурах до (-20)°С. Мульти-кронштейн с шарнирным механизмом позволяет закрепить ТВ монитор на удище или рядом с лункой, а солнцезащитный козырек обеспечивает отличную видимость экрана ТВ монитора при любом освещении [12].

Подводная видеокамера Фишка 703 имеет время работы до 12 ч от внешнего аккумулятора. Имеется мощной комбинированной подсветкой из 24 СД (12 ИК + 12 белых СД) [12], а также 7-дюймовый цветной ТВ монитор. Кабель выдерживает нагрузку до 30 кг, а видеокамера работает при температурах до -20°С. Дальность обзора в чистой воде - от 1 до 3 м [12].

Особенности видеокамеры MarCum Recon 5 Plus [1]: цветной ТВ монитор с размером диагонали 12,5 см. Технология Color Kill переключает цветной и черно-белый режимы и обеспечивает четкое и ясное изображение в условиях низкой освещенности. Настройки экрана — яркость, контрастность, резкость. Имеется встроенный DVR, возможность сделать снимок экрана, запись на внешнюю карту

Micro-S, СД белая и ИК подсветка. Есть три угла наблюдения: вниз, горизонтально, вверх. RCA-Video выход служит для присоединения внешнего ТВ монитора или записывающего устройств. Отображение информации на экране: направление обзора, глубина, температура и напряжение батареи аккумулятора [1].

Подводная видеокамера Пиранья 4.3-2cam [1] оснащена TFT LCD ТВ монитором с диагональю 4,3" и с разрешением 480x272 пикселей. Специальный защитный козырек, предохраняет дисплей от бликов на ярком солнце. ТВ монитор крепится на удильщике с помощью удобного кронштейна с поворотным механизмом. С помощью разборной стойки можно устанавливать ТВ монитор на различных поверхностях. В комплект устройства входят две видеокамеры: подводная и фронтальная. С видеокамеры на ТВ монитор можно выводить изображение только с подводной или фронтальной видеокамеры, или с обеих одновременно. Подводная видеокамера имеет разрешение 0,3 Мп, угол ее обзора 140°. Она позволяет снимать видео с разрешением 640x480 пикселей. Имеется ИК подсветка из 6 СД. На обратной стороне ТВ монитора крепится фронтальная видеокамера. Она имеет разрешение 1,2 Мп, угол ее обзора 120°. Эта видеокамера позволяет снимать видео с разрешением 1280x720 пикселей. Длина кабеля 20 м. Кабель способен выдерживать нагрузку в 20 кг. Видеокамера поддерживает карты памяти до 32 Гб. Она может работать при температурах от (-20) – (+60)°С. Питание видеокамеры осуществляется от двух Li-ion аккумуляторов напряжением 3,7 В, емкостью по 2200 мАч каждая. Время работы видеокамеры составляет около 5 ч. Масса видеокамеры - 360 г.

Подводная видеокамера Lucky FF3308-8 [1] оснащена TFT LCD ТВ монитором с диагональю 3,5" с разрешением 628x526 пикселей. ТВ монитор можно закрепить как на удочке, так и на специальной подставке. Подводная видеокамера имеет разрешение 0,25 Мп, угол ее обзора 120°. У видеокамеры имеется ИК подсветка из 8 СД. Длина кабеля - 20 м. Кабель способен выдерживать нагрузку в 12 кг. В комплекте с кабелем идет катушка, на которую можно удобно сматывать и разматывать кабель. Видеокамера может работать при температурах (-20) - (+60)°С. Питание видеокамеры осуществляется от встроенного аккумулятора емкостью 4000 мАч в течение от 8 до 10 ч.

Подводная видеокамера для рыбалки SITITEK FishCam-501 [1] использует ТВ монитор с диагональю 3,5 дюйма с разрешением 960x240 пикселей. Яркость ТВ монитора - 550 кд/м². Имеется регулировка яркости, контрастности, насыщенности, предусмотрен поворот изображения в вертикальное и горизонтальное положения. ТВ

монитор оснащен подставкой с поворотным механизмом. Угол обзора - 135°. Матрица видеокамеры имеет размер 1/3 дюйма и разрешение 0,3 Мп. Видеокамера способна давать четкое изображение при освещении менее 0,1 лк. Видеокамера оснащена мощной ИК подсветкой, состоящей из 8 СД, расположенных вокруг объектива видеокамеры. Светочувствительный датчик автоматически включает ИК-подсветку при недостаточной освещенности. Яркость ИК подсветки можно регулировать вручную. Видеокамера и ТВ монитор соединены между собой кабелем из эластичного и очень прочного материала. Длина кабеля составляет 15 м, диаметр кабеля 1 мм. Кабель выдерживает нагрузку в 10 кг. Видеокамера работает от аккумулятора емкостью 4000 мА/ч с временем работы 7-8 ч. Камера функционирует в диапазоне температур (-20°C) - (+60°C).

Комплект подводной видеокамеры MarCum LX-9-ROW+Sonar [1] совмещает в себе подводную видеокамеру и эхолот. Видеокамера оснащена TFT LCD ТВ монитором с диагональю 8", с разрешением 800x600 пикселей. Кабель имеет длину 22 м. Видеокамера оснащена высококачественной матрицей Sony Super HAD II CCD.

Подводная видеокамера MarCum LX-9-ROW+Sonar [1] оснащена двухлучевым сонаром, который позволяет измерять глубину, исследовать рельеф дна, искать места стоянки рыб. Рыболов имеет возможность сравнивать сигналы эхолота с подводным видео и тем самым получать более подробную картину происходящего под водой. Видеокамера имеет 12-уровневую систему подавления помех и цифровым зумом с возможностью плавной регулировки. Видеокамера позволяет наблюдать за происходящим под водой как в цветном, так и в черно-белом режиме. В видеокамере имеются четыре выбираемые цветовые палитры ТВ монитора. Технология «след радара» при любой глубине и при угле поля зрения датчика 8° или 20° отображает площадь покрытия дна. На ТВ мониторе отображается: температура воды и глубина, напряжение питания, уровень заряда батареи, глубина положения камеры и ее направление, уровень глушения помех. Всю отображаемую информацию можно записать в виде видео на SD-карту. Камера может использоваться и при низких температурах, вплоть до (-25)°C.

Подводная переносная видеокамера Aqua-Vu Micro 5 REVOLUTION PRO MICRO5.0REVPRO [1] имеет встроенный цифровой видеорегистратор для записи, а также цифровое отображение температуры и направления камеры на экране. Максимальная нагрузка на кабель до 10 кг. Тип подсветки: ИК и с двумя белыми СД. Длина кабеля - 15м [1]. Яркость подсветки: 300 кд/м². Есть запись видео. Разрешение

камеры 960x576 пикселей. Диагональ экрана: 5' дюймов. Габариты камеры Ø33,2x18 мм. Разрешение экрана 653x490 пикселей. Угол обзора видеокамеры. 125°. Разрывная нагрузка видеокабеля 10 кг. Напряжение питания 12 В. Емкость аккумулятора, мАч. 4000, напряжение 3,7 В. Класс влагозащиты IP67. Имеется встроенный DVR - запись видео, температуры воды и направления глазка. Есть универсальные крепления для подледной ловли и на открытой воде; козырек от солнца; RCA видео выход, датчик температуры. Для эхолота количество лучей 3. Максимальная глубина сканирования 15 м. Класс защиты IP67. Питание - от аккумулятора с емкостью 4000 мА·ч. Рабочая температура (-20) – (+40)°С Габариты - 27x 75 x 18 мм Масса - 996 г.

Комплект подводной видеокамеры для летней и зимней рыбалки VIEWEYE [1] от китайского производителя ViewEoy содержит цветной ТВ монитор с крышкой, защищающей от ударов, случайного нажатия и подводную видеокамеру в корпусе из добротного ABS пластика с сапфировым стеклом. Угол обзора 120°. Видимость от 0,6 м до 3 м. Класс защиты IP68, есть ИК СД (8 шт.). Есть силиконовый кабель длиной 15 м или 25 м. Диапазон рабочих температур (-20) – (+60)°С. Время работы 6 - 7 ч, Расположение корпуса - на удильщике Класс влагозащиты IP67 Тип питания от сети 12 В. Емкость аккумулятора 2600 мА·ч. Диагональ экрана 4.3". Разрешение экрана 480x272 пикселей. Габариты камеры 17 x 8 мм масса 1 г; время работы 8 ч.

Комплект подводной видеокамеры Rivertech C5, для зимней рыбалки, с компасом, имеет ТВ монитор с диагональю 5" [1]. Видеокамера предназначена для исследования любых водоемов и поиска рыбы. Камера оснащена функцией компаса, т. е. отображает направление объектива. Переносной портативный цветной TFT-ТВ монитор имеет разрешение 960x480 пикселей для работы на глубине 10 - 15 м при среднем уровне прозрачности воды. Наличие солнцезащитного козырька обеспечивает защиту от бликов на экране. Усиленная подсветка видеокамеры состоит из 2 белых и 4 ИК СД. Можно детально рассмотреть особенности рельефа дна, обнаружить коряги и свалы, выбрать нужную глубину и место для рыбалки, оптимизировать варианты снастей и наживки. Масса видеокамеры 675 г; Длина кабеля 15 м; Разрывная нагрузка кабеля: до 15 кг; память до 128 Гб. Есть фото- и видеозапись: есть. Разрешение видеокамеры: 720x480 пикселей Разрешение ТВ монитора: 960x480 пикселей. Есть индикатор заряда. Угол обзора 130°. Емкость аккумулятора: 10 000 мАч. Работа от аккумулятора составляет 6 часов. Габариты 70x155x109 мм. Имеется фиксатор монитора на удочку и на руку.

Подводная видеокамера для рыбалки 4,3-дюймовым ЖК ТВ монитором содержит визуальный эхолот [1]. Видеокамера имеет солнцезащитный козырёк для более удобного использования. Аккумулятор ёмкостью 5000 мАч может работать до 8 часов. Материал корпуса АБС-пластик; Угол обзора: 220°; Разрешение экрана ТВ монитора 480 x 272; Длина кабеля 15 метров; есть ИК СД; Ёмкость аккумулятора 5000 мАч; напряжение батареи 7,4 В; время работы: 6 - 8 ч; Класс защиты: IP68; Входное напряжение: 5 В; Рабочая температура (-20) - (+60)°С. Класс влагозащиты IP68.

Подводная видеокамера для зимней и летней рыбалки Erchang F431-B (рисунок 6в) [1] имеет 4.3-дюймовый цветной TFT ТВ монитор с разрешением 1280x720 при среднем уровне прозрачности воды. Солнцезащитный козырек защищает от бликов на экране. Угол обзора 130°. Используются 6 ИК СД. Питание - от встроенного аккумулятора ёмкостью 4000 мАч. Класс защиты IP68. Кабель имеет длину 15 м. Ёмкость карты памяти до 32 Гб. Время работы: до 10 часов Рабочая температура: (-20) – (+60)°С. Класс защиты IP68

Подводная видеокамера для рыбалки SONY IMX225 (рисунок 6г) [1] имеет ТВ монитор с диагональю 4,3 дюйма. Угол обзора 195°. Кабель имеет длину 15 / 20 / 30 м. Аккумулятор ёмкостью 5000 мАч обеспечит до 6 часов непрерывной работы. Есть 3 режима ИК СД подсветки. Видеокамера выполняет функцию ручного эхолота. ТВ монитор имеет солнцезащитный козырек. Максимальная глубина 15 м. Угол охвата 195°. Класс защиты IP68. Тип питания - от аккумулятора ёмкостью 5000 мАч Рабочая температура (-20) – (+60)°С. Разрешение экрана 1280x960 пикселей. Габариты 150 x 30 x 100 мм. Масса 350 г

Подводная видеокамера для рыбалки AVT miniDR (рисунок 3б) [1] имеет 7" цветной дисплей. Видеокамера имеет разрешение 1000 ТВ линий. Есть 12 белых СД. Объём памяти 32 Гб. Возможность записи фото и видео. Возможна запись на SD-карту. Большой контрастный цветной монитор имеет диагональ 7" (около 18 см). Прочный алюминиевый кейс в комплекте вмещает в себя прибор и все аксессуары к нему, надёжно защищая их от повреждений в любых условиях. Устройство работает в диапазоне температур (-20) - (+60)°С. Аккумулятор, обеспечивает 7 часов работы при его ёмкости 4000 мА/ч. Масса - 1,6 кг Кабель имеет длину 15 м. Питание - 12,6 В. Габариты 210 x 110 x 120 мм. Угол обзора 92°, ТВ монитор имеет разрешение 960x480 пикселей.

Подводная видеокамера EGP 15 м с ИК подсветкой имеет ТВ монитор с диагональю 4,3 дюйма имеет эхолот [1]. Кабель имеет длину 15 м. Видеокамера имеет

удобный и яркий экран с разрешением 960x640 пикселей. Это позволяет получать высококачественное и четкое изображение под водой. Имеется антибликовый экран. Встроенный аккумулятор имеет емкость 2500 мАч, что обеспечивает до 8 ч работы. Напряжение питания 9 В. Масса камеры - 750 г. Максимальная глубина сканирования 15 м. Рабочая температура: (-20) - (+ 60)°С. Габариты видеокамеры: Ø32x21 мм. Видеокамера имеет металлический корпус, сапфировое стекло. Размер матрицы 1/3 дюйма CMOS. Разрешение 1000 ТВ линий. Угол обзора: 120° - Видеокамера имеет 8 ИК СД. Длина кабеля: 25 м. Класс защиты IP68.

Видеокамера CARCAM FISHING CAMERA FC-009SH [1] оснащена большим цветным экраном и камерой с разрешением 960x480 пикселей. Видеокамера имеет 12 СД, что позволяет видеть под водой до 3 м. Видеокамера имеет функцию видеорегистратора и фотосъемки. Расположение корпуса - переносное Класс защиты IP68. Питание - от аккумулятора емкостью 4500 мАч Экран цветной. Диагональ экрана 7". Разрешение экрана 960x480 пикселей. Габариты: 240 x 210 x 140 см Длина кабеля 20 м; максимальное время работы: 8 ч: Яркость экрана до 1800 лм, угол обзора около 200°. Есть возможность настройки фокусного расстояния и контрастности. Встроенная батарея емкостью 5000 мАч обеспечивает до 7 часов работы. Есть поддержка сигнала CVBS и регулируемое выходное напряжение от 6 до 24 В. Расположение корпуса - на удиле Экран имеет диагональ 4.3" Разрешение экрана 800x480 пикселей.

Подводная видеокамера SITITEK FishCam-550 DVR имеет функцию записи и обнаружения рыбы [1]. Видеокамера устанавливается на удочку и подходит для зимней рыбалки. Видеокамера имеет разрешение 1000 ТВЛ. Запись видео на карту памяти. micro SD объемом до 128 Гб. Также поддерживается сохранение фотоснимков. Есть программный детектор движения, который улавливает любые изменения в кадре и оповещает пользователя звуковым сигналом. Есть регулируемая ИК подсветка на 8 СД. Вокруг объектива видеокамеры расположены ИК СД. Есть 5 уровней регулировки яркости. Диапазон рабочих температур — (-20) - (+60)°С. Устройство имеет 15-метровый видеокабель с прочностью на разрыв 30 кг, цветной монитор с экраном 5" и откидной крышкой, выступающей в роли солнцезащитного козырька, а также различные приспособления для крепления изделия на удочке. Видеокамера цветная имеет 1/3". Угол обзора 120°. Видимость в воде 0,2 - 3 м. Цветной экран имеет диагональ 5 дюймов и разрешение 800x480 пикселей. Видео разрешение — 720x576 пикселей, формат AVI. Есть карты памяти microSD объемом до 128 Гб Zoom цифровой, 5^x. Емкость аккумулятора 4000 мА/ч, Время работы до 6 ч Материалы корпуса

видеокамеры — металл, защитная оптика — закаленное стекло, Корпус ТВ монитора выполнен из пластика. Габариты ТВ монитора 150 x 105 x 55 мм; видеокамеры Ø36 x 22 мм. Масса ТВ монитора 350 г; видеокамеры 10 г. Имеется кронштейн для крепления ТВ монитора на удочку; держатель и комплект крепежа на удочку для видеокамеры; поплавков.

Подводная видеокамера для рыбалки с вакуумным дисплеем [1]. для зимней и летней рыбалки EGP PRO 7 L 15 является лучшей вакуумным устройством для подледной рыбной ловли. ТВ монитор имеет диагональ 7 дюймов. Есть подсветка из 12 СД. Большой козырек в комплекте защитит экран от солнечных лучей. Батарея состоит из 6 аккумуляторов, обеспечивающих работу до 10 ч. Удобное крепление на видеокамере позволяет снимать видео горизонтально, вертикально и под углом 45°. Температурный режим работы устройства (-20) – (+ 60)°С. Стабилизатор для видеокамеры работает очень четко. Класс защиты IP 68. Емкость аккумулятора 4500 мАч. Максимальное разрешение экрана 960x480 пикселей. Габариты экрана: 240 x 110 мм, масса ТВ монитора 3 кг, длина кабеля 15 м; максимальное время работы 10 ч; имеется эхолот. Материал корпуса - пластик, алюминий. Угол обзора 120°.

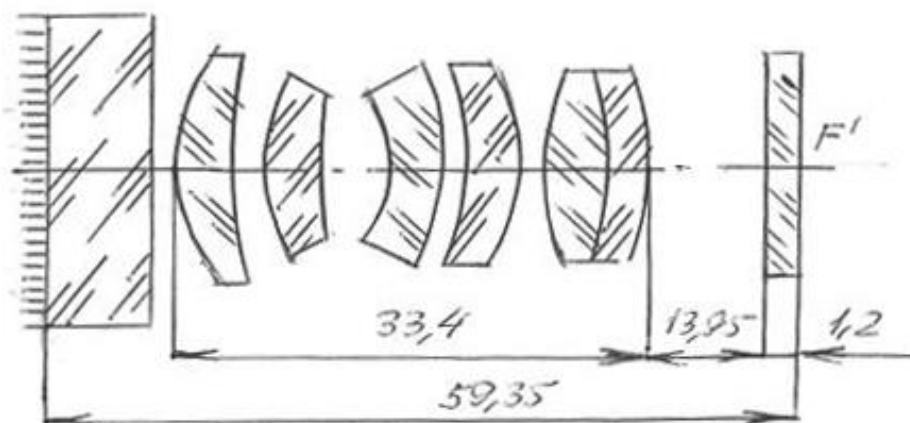
Подводная видеокамера для рыбалки [1] имеет козырек от солнца, габариты 130x93x60 мм, массу 0,38 кг. Цветной ТВ монитор имеет диагональ 4,3", есть солнцезащитный козырек. Имеется подсветка с 8 ИК СД. Кабель имеет длину 20 м. Аккумулятор емкостью 2600 мАч обеспечивает 5 - 6 часов работы Максимальный угол обзора 120°. Класс влагозащиты IP68. Максимальная рабочая температура (-40) – (+50)°С. Разрешение экрана 800x480 пикселей. Масса ТВ монитора 375 г.

Подводная видеокамера «Барракуда 4.3» (рисунок 6д) [13] имеет цветной ЖК-дисплей с диагональю 4,3 дюйма и кабель длиной 30 м, который выдерживает нагрузку 30 кг. Имеется солнцезащитный козырек-крыша, Питание видеокамеры осуществляется с помощью аккумулятора, обеспечивающего 7 - 8 часов работы. Видеокамерой можно пользоваться при температурах (-20) -(+60)°С Разрешение экрана составляет 320 x 240 пикселей. Возможна программная регулировка яркости, контраста и насыщенности изображения экрана. Разрешение видеокамеры составляет 0,3 Мп.. Угол обзора - 150°. Видеокамера может использоваться в двух положениях: вид сверху на наживку и вид сбоку по горизонту. Есть ИК подсветка видеокамеры из 4-х ИК СД. Устройство работает при температурах (-20) - (+60)°С. Есть специальный кронштейн для крепления ТВ монитора на удище. Работа без подзарядки до 7 - 8 ч. Видеокамера оснащается двумя аккумуляторами формата 18650 емкостью 2000 мАч каждый. Имеется функция

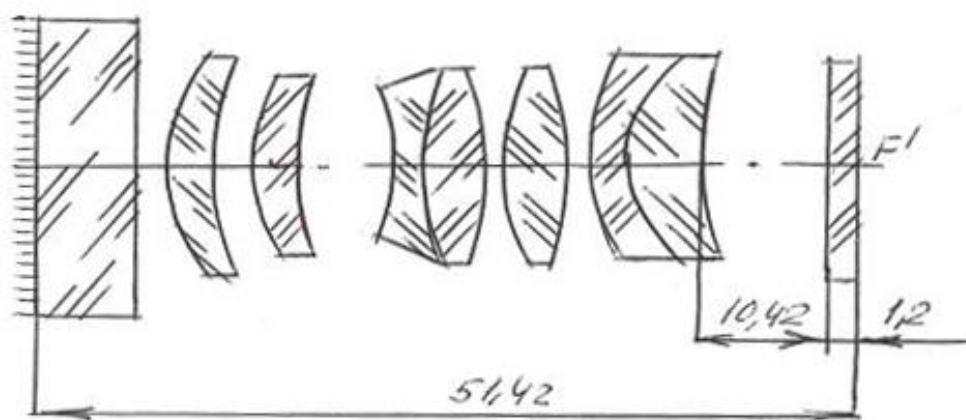
видеозаписи на съемную карту microSD емкостью до 32 Гб. Возможна регулировка яркости, контраста и насыщенности изображения экрана. Радиус действия до 20 м. Кабель, соединяющий дисплей и подводную камеру, выполнен из водонепроницаемого материала с использованием стальной жилки, которая позволяет выдерживать нагрузки до 20 кг. Видео записывается с разрешением 640 x 480 пикселей (частота кадров 30 Гц). В комплект видеокамеры входит кронштейн, с помощью которого дисплей можно закрепить на собственной удочке. Размеры видеокамеры (длина x диаметр) 22 x 40 мм, масса около 18 г Питание - от блока с дисплеем Размер матрицы 1/3" CMOS. Угол обзора 150°. Разрешение видео 640 x 480 пикселей (30 к/с) Габариты ТВ монитора 134 x 92 x 28 мм, масса около 320 г. Размер цифрового ЖК дисплея 4,3" (10,9 см). Разрешение дисплея 320 x 240 пикселей Яркость подсветки дисплея - регулируемая, 3 уровня.

Подводные гидрообъективы

На рисунке *ба, б* представлены оптические схемы подводных гидрообъективов «Гидробизар-1», и «Гидробизар-2». Они работают в области спектра 480 – 600 нм соответствующей оптимальному рабочему диапазону подводного видения при нормальной прозрачности воды и ее замутнении. Объективы имеют фокусное расстояние 25 мм, относительное отверстие 1:1,3, угол поля зрения 30°. Масс объективов без иллюминатора составляет 21 г, а с иллюминатором – 36 г. Коэффициент передачи контраста на пространственной частоте 30 штр/мм составляет для центра поля зрения 0,96, а для края поля зрения – 0,8. Длина объектива «Гидробизар-1» составляет 60,55 мм, а объектива «Гидробизар-2» – 52,62 мм [17].



а)



б)

Рисунок 7 – Оптические схемы гидрообъективов для подводных видеокамер: а – «Гидробизар-1», б – «Гидробизар-2»

При погружении в воду объектива видеокамеры с иллюминатором он вызовет изменение угла поля зрения и фокусного расстояния (а, значит, и масштаба изображения) гидрообъектива в соответствии с формулами [17]:

$$\operatorname{tg} \beta_a = n_w \operatorname{tg} \beta_w (1 - \operatorname{tg}^2 \beta_w (n_w^2 - 1))^{-0,5},$$

$$f_w = f_a n_w (1 - \operatorname{tg}^2 \beta_w (n_w^2 - 1))^{-0,5},$$

где β_a , β_w – угол поля зрения гидрообъектива в воздухе и в воде соответственно, град.; f_a , f_w – фокусное расстояние гидрообъектива в воздухе и в воде соответственно, мм; n_w – показатель преломления воды.

При малых углах β_w значение $\operatorname{tg} \beta_w \ll 1$, поэтому $f_w = f_a \times n_w$, т.е. масштаб изображения увеличивается в $n_w \sim 1,33$ раза. Кроме того, он еще и изменяется по полю зрения в соответствии с законом $(1 - \operatorname{tg}^2 \beta_w (n_w^2 - 1))^{-0,5}$ [2.4.8]. Это приводит к дополнительной дисторсии, которая при $\beta_w > 30^\circ$ превышает 15%. Легко также показать, что в воде угол поля зрения уменьшается в $\sim 1,33$ раза, т.е. на $\sim 25\%$, а светосила – в $\sim n_w^2$ раз. В воде уменьшается фокусировка гидрообъектива для объектов, находящихся на конечном расстоянии. Они воспринимаются как расположенные на расстоянии в $\sim 1,33$ раз ближе к гидрообъективу, чем на самом деле [17].

Для сохранения практически неизменным угла поля зрения гидрообъектива при перемещении видеокамеры из воздуха в воду может быть использован сферический иллюминатор. В случае его применения оптический центр гидрообъектива должен быть точно установлен в центре кривизны сферической поверхности иллюминатора. При этом лучи света идут практически нормально к оптической поверхности

гидрообъектива, и возникают незначительные аберрации. Однако при перемещении гидрообъектива относительно иллюминатора возникают серьезные нарушения качества изображения, в особенности для больших углов поля зрения. Для компенсации качества изображения приходится дополнительно использовать корректирующие линзы. Расчет такого гидрообъектива должен быть выполнен с учетом наличия в ходе лучей сферического иллюминатора и корректирующей линзы. Это приводит к усложнению конструкции гидрообъектива, в особенности для светосильных и широкопольных оптических систем [17].

Перспективы дальнейшего развития подводных видеокамер для рыбалки

Подводные видеокамеры будут продолжать свое совершенствование. Оно связано с увеличением глубины погружения, расширения функциональных возможностей и прежде всего с повышением качества изображения и чувствительности видеокамер. Для создания таких видеокамер наиболее подходят CMOS матрицы, обладающие настолько высокой чувствительностью. При этом для видеокамеры должны быть использованы светосильные широкоугольные гидрообъективы с асферическими оптическими поверхностями с киноформной и градиентной оптикой. Это позволит существенно повысить качество изображения и светосилу объектива, а, значит, увеличить дальность подводной фото- и видеосъемки. Дальнейшие перспективы развития подводных видеокамер связаны с их объединением с гидролокаторами-звуковизорами. Это позволит существенно расширить поисковые возможности подводных видеокамер, причем в неблагоприятных условиях видения под водой (замутнение, турбулентность и др.).

Выводы

1. Основное направление - создание многоканальных систем. Такая система должна содержать, кроме видеокамеры и средств подсвета, эхолот и датчики температуры, давления воды, солености, глубины погружения.
2. Вместо дисплея, вмонтированном в переносном ящике, можно использовать наголовные дисплеи, обеспечивающие большую легкость, компактность и мобильность устройства.
3. Устройство должно обеспечить дистанционную передачу изображения в наземных условиях для его изучения в наземной лаборатории.

4. Необходима система записи и тиражирования изображения с использованием персонального компьютера.
5. Необходимо озвучивание изображений для снабжения их комментариями в реальном масштабе времени.
6. Представляется целесообразным компьютерное распознавание видов рыб для выборочной рыбной ловли.
7. Необходима автоматическая подзарядка источника питания.

Литература

1. Любителям зимней рыбалки – Топ 10 подводных камер. spinningpro.ru. Подводные камеры для рыбалки. [Электронный ресурс] URL: <http://www.drive2.ru> (дата обращения 01.10.2025).
2. Камеры для зимней рыбалки – все, что нужно знать рыбаку. [Электронный ресурс] URL: <http://www.fish-ca.ru> (дата обращения 01.10.2025).
3. Подводная камера для зимней рыбалки – стоит ли обзавестись? Для чего нужна? [Электронный ресурс] URL: <http://www.gadgethage.ru> (дата обращения 01.10.2025).
4. Обзор камер для летней рыбалки. [Электронный ресурс] URL: <http://www.larybat.com> (дата обращения 01.10.2025).
5. Удочки для рыбалки с видеокамерой. [Электронный ресурс] URL: <http://www.intelfishing.ru> (дата обращения 01.10.2025).
6. Как пользоваться подводной камерой для рыбалки. Обзор подводных камер для зимней рыбалки. Критерии выбора камеры. [Электронный ресурс] URL: <http://www.mirinov-ovoshi.ru> (дата обращения 01.10.2025).
7. Выбираем подводную камеру для рыбалки. [Электронный ресурс] URL: <http://www.lodki-volga.ru> (дата обращения 01.10.2025).
8. Как выбрать хорошую видеокамеру для рыбалки. [Электронный ресурс] URL: <http://www.technika-expert> (дата обращения 01.10.2025).
9. Подводный дрон и разные типы видеокамер для подводной рыбалки. [Электронный ресурс] URL: <http://www.aattech.ru> (дата обращения 01.10.2025).
10. Как выбрать лучшую подводную камеру для зимней рыбалки? Markachetva.ru. 20 лучших подводных камер для зимней рыбалки 2024 года. [Электронный ресурс] URL: <http://www.dzen.ru> (дата обращения 01.10.2025).

11. Что надо знать о подводных камерах для рыбной ловли. [Электронный ресурс] URL: <http://www.boatlab.pro> (дата обращения 01.10.2025).
12. Лучшие подводные камеры для зимней рыбалки. Топ-10 популярных моделей – 2025 и советы по выбору. [Электронный ресурс] URL: <http://www.fishingsib.ru> (дата обращения 01.10.2025).
13. Видеокамера для рыбалки Барракуда 4.3 с большим дисплеем, устойчива к морозам. [Электронный ресурс] URL: <http://www.telies24.ru> (дата обращения 01.10.2025).
14. «Барракуда 4.3» - купить подводную камеру для рыбалки по сходной цене. [Электронный ресурс] URL: <http://www.help-24.ru> (дата обращения 01.10.2025).
15. Волков В.Г., Гиндин П.Д. Достижения в технике видения. М.: Техносфера, 2019 г., Часть 1, 580 с.
16. Грязин Г.Н. Основы и системы прикладного телевидения. М.: Политехника, 2011г., 274 с. [Электронный ресурс] URL: <http://www.litres.ru>. (дата обращения 01.10.2025).
17. Гейхман И.Л., Волков В.Г. Видение и безопасность. М.: Новости, 2009, 840 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА МОНИТОРИНГА ЗАГРЯЗНЕНИЙ НЕФТЕПРОДУКТАМИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В БЛИЖНЕЙ ИК ОБЛАСТИ СПЕКТРА

Ю.В. Федотов, Нгуен Минь Бач, Н.В. Барышников, М.Л. Белов

Аннотация: Статья посвящена экспериментальным исследованиям эффективности метода обнаружения загрязнений нефтепродуктами земной поверхности в ближней инфракрасной области спектра. Приведены результаты измерения спектров отражения незагрязненных и загрязненных нефтепродуктами почв при естественном освещении Солнцем и облучении лампой. Показано, что несмотря на сильное влияние атмосферы на солнечное излучение спектральные провалы (вызванные поглощением излучения углеводородными соединениями) хорошо видны в спектрах отражения около длин волн 1730 нм и 2300 нм. Спектральный диапазон около длины волны 1730 нм представляется наиболее перспективным для дистанционного мониторинга нефтяных загрязнений на земной поверхности. Математическое моделирование проводилось для аппаратуры с центральными длинами волн 1675, 1734, 1775 нм и тремя спектральными каналами с шириной 10 и 50 нм при естественном освещении измеряемых образцов Солнцем, так и при их облучении лампой. Показано, что при относительном среднеквадратическом значении шума 3 % можно обеспечить вероятность правильного обнаружения нефтяных загрязнений на земной поверхности более 82 % при вероятности ложных тревог менее 3 %.

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

STUDY OF THE EFFECTIVENESS OF THE METHOD FOR MONITORING OIL POLLUTION OF THE EARTH'S SUR-FACE IN THE NEAR-INFRARED RANGE

Yu.V. Fedotov, Bach Nguyen Minh, N.V. Baryshnikov, M.L. Belov

Abstract: The article is devoted to experimental studies on the effectiveness of the method for detecting oil pollution on the earth's surface in the near-infrared range. The results of measurement of spectra of reflection of unpolluted and contaminated with oil soils under

natural lighting by the sun and irradiation by lamp are given. It is shown that despite the strong influence of the atmosphere on solar radiation, spectral notches (caused by absorption of the radiation by hydrocarbon compounds) are well visible in the reflection spectra around the wavelengths 1730 nm and 2300 nm. The spectral range of about 1730 nm is the most promising for remote monitoring of oil pollution on top of the earth. Mathematical modelling was carried out for apparatus with central wavelengths 1675, 1734, 1775 nm and three spectral channels of widths 10 and 50 nm, both when illuminated by the Sun and when illuminated by a lamp. It is shown that with a natural light and relative standard noise value of 3 % the probability of correct detection of oil pollution on the earth surface can be more 82 %, while the probability of false alarm is less 3%.

Keywords: optical method, detection of oil pollution, earth's surface, near IR range.

Введение

На сегодняшний день актуальной является задача экологического мониторинга загрязнений нефтью и нефтепродуктами земной и водной поверхности. Дистанционные пассивные и активные оптические методы являются одними из наиболее эффективных средств, решающих эту задачу [1-4].

При этом, если для водной поверхности к настоящему времени разработаны и созданы различные оптические методы и приборы для дистанционного обнаружения нефтяных загрязнений, то для земной поверхности продолжается поиск наиболее эффективных средств мониторинга нефтяных загрязнений. Причиной этого является сложность обнаружения загрязнений нефтью и нефтепродуктами на фоне других природных образований на земной поверхности.

Одним из наиболее перспективных методов мониторинга нефтяных загрязнений на земной поверхности является метод, основанный на регистрации спектров отражения в ближней инфракрасной области спектра. Этот метод основан на наличии спектральных провалов (вызванных поглощением излучения углеводородными соединениями, находящимися на поверхности) в спектрах отражения земных поверхностей, загрязненных нефтепродуктами (см., например, [5-12]).

На рисунках 1а, 1б приведены примеры спектров отражения незагрязненных почв (пунктирные линии) и почв, загрязненных нефтепродуктами (сплошные линии) в ближней ИК области спектра (по нашим данным измерений).

Здесь стрелками на рисунках показаны спектральные провалы в спектрах отражения загрязненных нефтепродуктами образцов почвы, вызванные поглощением излучения загрязненной поверхностью около длин волн 1730 и 2300 нм.

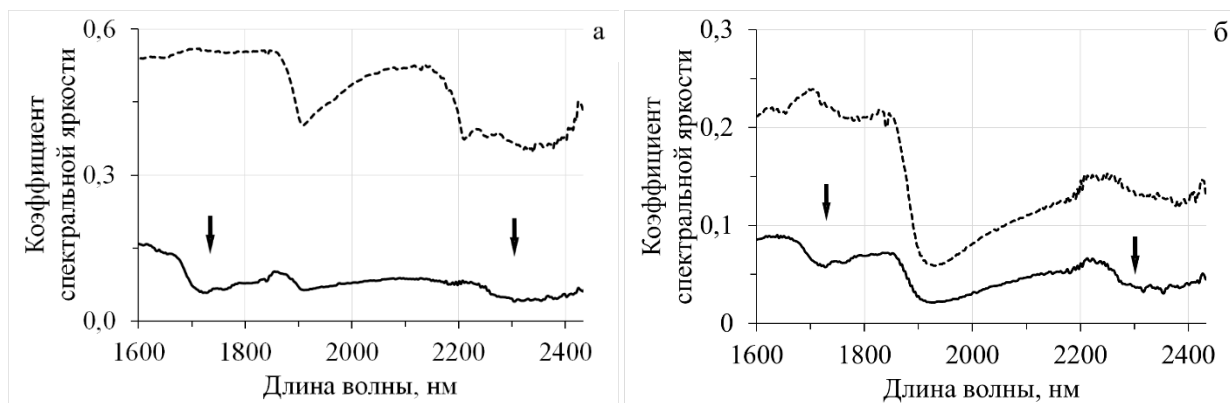


Рисунок 1 – Спектр отражения: *а* – песка, загрязненного полусинтетическим моторным маслом; *б* – почвы, загрязненной дизельным топливом

Первым этапом работы по созданию аппаратуры мониторинга загрязнений нефтью и нефтепродуктами земной поверхности является создание банка данных коэффициентов спектральной яркости незагрязненных и загрязненных нефтью и нефтепродуктами земных поверхностей.

Банк данных должен содержать информацию об отражательной способности незагрязненных и загрязненных нефтепродуктами земных поверхностей для разных видов почв, разных нефтепродуктов, разном состоянии почвы, разных метеоусловиях и т.п. в спектральной области по крайней мере от 1,6 мкм до 2,4 мкм.

В банке данных должны содержаться величины спектральной отражательной способности, независимые от конкретных условий освещения во время проведения измерений. Методика проведения таких измерений основана на одновременном (или практически одновременном - разделённым коротким интервалом времени, за который условия освещения не изменяются) измерении образца загрязненной (или незагрязненной) почвы и эталонного отражателя.

Наиболее просто такие измерения организовать в лабораторных условиях, используя искусственный источник освещения [13-15].

Однако, при этом возникает вопрос о соответствии данных измерений, полученных при искусственном и естественном освещении.

В работе приводятся результаты экспериментального исследования спектров отражения незагрязненных и загрязненных нефтепродуктами почв и эффективности

метода мониторинга нефтяных загрязнений в ближней ИК области спектра при искусственном и естественном освещении.

Лабораторная установка для измерения спектров отражения образцов почвы

Экспериментальные исследования проводились на лабораторной установке, структурная схема которой показана на рисунке 2.



Рисунок 2 – Структурная схема установки для измерения спектров отражения

В экспериментах для облучения образцов почвы использовалось как естественное излучение Солнца, так и источник искусственного света (галогеновая лампа) Zholix Instruments GLORIA-T150A.

Спектрометр высокого разрешения OPTOSKY АТП8000 [16] регистрировал сигнал в диапазоне 900-2500 нм с разрешением ~ 10 нм.

Результатами измерений были коэффициенты спектральной яркости (незагрязненных и загрязненных образцов почвы), определяемые как отношение яркости излучения, рассеянного измеряемыми образцами в заданном направлении (у нас - в направлении близком к вертикальному), к яркости излучения, рассеянного эталонным отражателем (эталонем Edmund Optics Spectralon).

При проведении экспериментов образцы почвы (песка и почвы из сада) помещались в пластиковые прямоугольные контейнеры. Нефтепродукты распределялись (использовался шприц) по всей поверхности образца. Расстояние от измеряемого образца до объектива спектрометра ~ 50 см. Измерения проводились в летнее время года при солнечной безоблачной погоде.

Результаты измерений спектров отражения образцов

На рисунках 3,4 показаны спектры отражения незагрязненных образцов (пунктирная линия) и спектры отражения загрязненных образцов сразу после разлива нефтепродуктов (сплошная линия). Загрязнителем служило моторное масло.

На рисунке 3 приведены результаты измерений для песка, а на рисунке 4 – для почвы из сада. Рисунки 3а, 4а соответствуют измерениям при использовании для освещения образцов галогеновой лампы, а рисунки 3б, 4б – излучением Солнца.

На всех рисунках показаны результаты, усредненные по 100 измерениям.

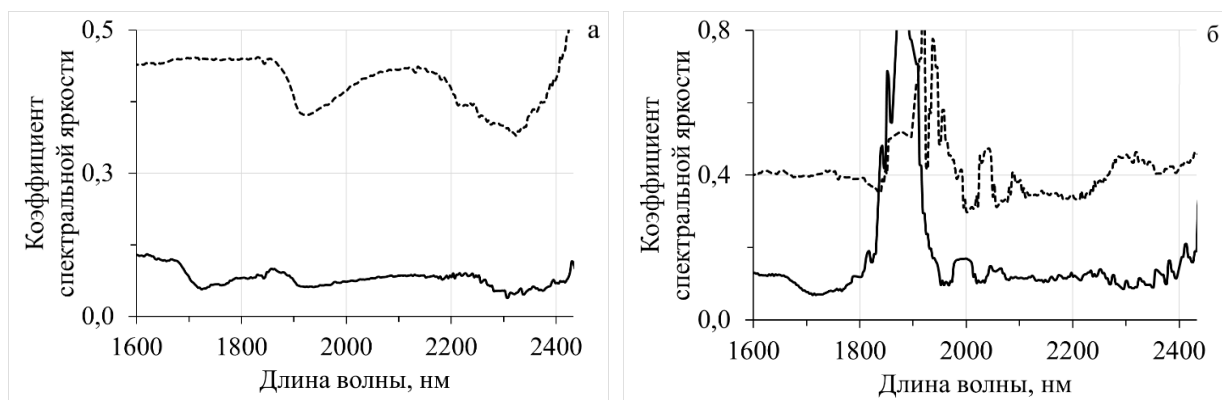


Рисунок 3 – Спектр отражения песка, загрязненного моторным маслом: а – при использовании для освещения галогеновой лампы; б – Солнца

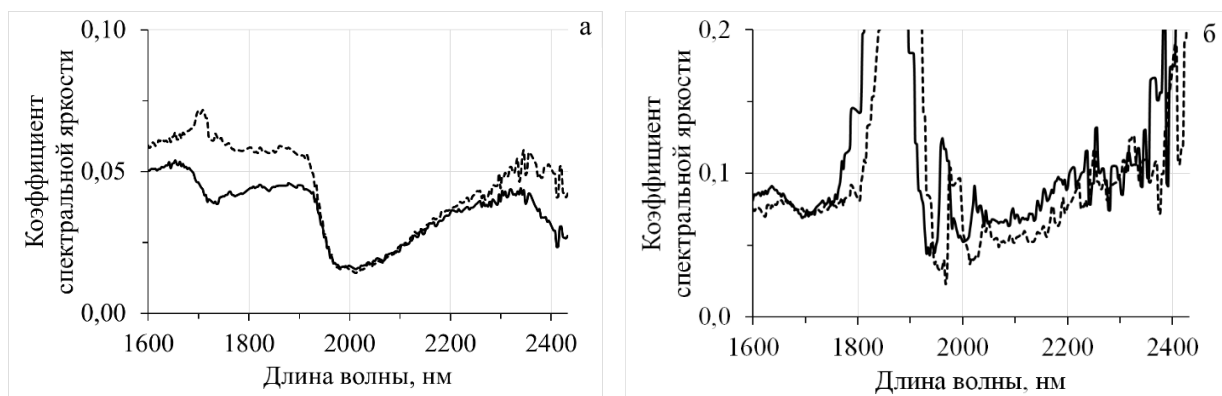


Рисунок 4. Спектр отражения почвы из сада, загрязненной моторным маслом: а – при использовании для освещения галогеновой лампы; б – Солнца

Рисунки 3б и 4б показывают сильное влияние земной атмосферы (при естественном освещении образца излучением Солнца) в спектральном диапазоне 1800-2100 нм. Причиной этого является сильное поглощение в этом диапазоне излучения Солнца атмосферными газами [17]. Вторая полоса поглощения начинается около длины волны 2400 нм и это тоже видно на рисунках.

Однако, несмотря на сильное влияние атмосферы на солнечное излучение спектральные провалы (вызванные поглощением излучения нефтепродуктами) хорошо видны на рисунках 3б и 4б около длин волн 1730 нм и 2300 нм. При этом, спектральный диапазон около длины волны 1700 нм представляется наиболее перспективным для дистанционного мониторинга нефтяных загрязнений на земной поверхности.

Результаты математического моделирования

Для количественной оценки эффективности дистанционного метода мониторинга нефтяных загрязнений в ближней ИК области спектра проводилось математическое моделирование.

Для обнаружения загрязнений нефтепродуктами земной поверхности в спектральном диапазоне около длины волны 1,73 мкм проводится оценка углеродного индекса HI , определяемого как (см., например, [18-20]):

$$HI = (\lambda_B - \lambda_A) \frac{R_C - R_A}{\lambda_C - \lambda_A} + R_A - R_B \quad (1)$$

где: $\lambda_A, \lambda_B, \lambda_C$ - длины волн, выбранные около 1,73 мкм; R_A, R_B, R_C - коэффициенты отражения на выбранных длинах волн.

Для поверхности с загрязнением нефтью и нефтепродуктами углеводородный индекс $HI > 0$. Для незагрязненной поверхности углеводородный индекс $HI = 0$.

Расчеты углеводородного индекса по формуле (1) проводились для аппаратуры с центральными длинами волн 1675, 1734, 1775 нм и тремя спектральными каналами с шириной 10 и 50 нм.

При математическом моделировании в условиях аддитивного шума измерения определялись (по 10000 шумовых реализаций) вероятности правильного обнаружения загрязнений нефтепродуктами P_d (когда алгоритм обработки показывал наличие загрязнений в случае, когда измеряемые образцы были действительно загрязнены нефтепродуктами) и вероятности ложных тревог P_a (когда алгоритм обработки показывал наличие загрязнений в случае, когда измеряемые образцы не были загрязнены). Полагалось, что шум распределен по нормальному закону и имеет нулевое среднее значение. Единственной характеристикой такого шума является его относительное (по отношению к спектральному коэффициенту отражения) среднеквадратическое значение $\delta = 1-10 \%$.

В таблицах 1-4 приведены результаты оценки (по нашим данным измерений незагрязненных и загрязненных моторным маслом образцов песка) вероятностей правильного обнаружения загрязнений нефтепродуктами P_d и вероятности ложных тревог P_a при относительных среднеквадратических значений шума измерения $\delta=1, 2, 3 \%$ для случая освещения измеряемых образцов излучение Солнца и галогеновой лампы.

Таблица 1 – Вероятности P_d и P_a . Освещение Солнцем. Ширина спектральных каналов 10 нм.

Вероятности обнаружения и ложных тревог	Относительное среднеквадратическое значение шума измерения, %		
	1	2	3
P_d	99,95	94,45	85,52
P_a	<0,01	0,05	0,92

Таблица 2 – Вероятности P_d и P_a . Освещение Солнцем. Ширина спектральных каналов 50 нм.

Вероятности обнаружения и ложных тревог	Относительное среднеквадратическое значение шума измерения, %		
	1	2	3
P_d	99,58	90,68	81,77
P_a	<0,01	0,19	2,99

Таблица 3 – Вероятности P_d и P_a . Освещение лампой. Ширина спектральных каналов 10 нм.

Вероятности обнаружения и ложных тревог	Относительное среднеквадратическое значение шума измерения, %		
	1	2	3
P_d	>99,99	>99,99	>99,99
P_a	<0,01	1,80	7,88

Таблица 4 – Вероятности P_d и P_a . Освещение лампой. Ширина спектральных каналов 50 нм.

Вероятности обнаружения и ложных тревог	Относительное среднеквадратическое значение шума измерения, %		
	1	2	3
P_d	>99,99	>99,99	>99,99
P_a	<0,01	1,68	7,71

Отметим, что вероятности правильного обнаружения и ложных тревог (как видно из таблиц) не сильно зависят от ширины спектральных каналов аппаратуры.

Результаты, приведенные в Таблицах 1-4, дают оценки эффективности дистанционного метода мониторинга нефтяных загрязнений в ближней ИК области спектра около длины волны 1,73 мкм в случае освещения измеряемых образцов Солнцем и галогеновой лампой.

В случае использования спектральных каналов с центральными длинами волн 1675, 1734, 1775 нм при естественном освещении и относительном среднеквадратическом значении шума 3% можно потенциально обеспечить вероятность правильного обнаружения нефтяных загрязнений на земной поверхности более 82 % при вероятности ложных тревог менее 3 %.

Выводы

Таким образом, проведены экспериментальные исследования эффективности метода обнаружения загрязнений нефтепродуктами земной поверхности в ближней инфракрасной области спектра. Приведены результаты измерения спектров отражения незагрязненных и загрязненных нефтепродуктами почв при естественном освещении Солнцем и облучении лампой. Показано, что несмотря на сильное влияние атмосферы на солнечное излучение спектральные провалы (вызванные поглощением излучения углеводородными соединениями) хорошо видны в спектрах отражения около длин волн 1730 нм и 2300 нм. Спектральный диапазон около длины волны 1730 нм представляется наиболее перспективным для дистанционного мониторинга нефтяных загрязнений на земной поверхности. Математическое моделирование проводилось для аппаратуры с центральными длинами волн 1675, 1734, 1775 нм и тремя спектральными каналами с шириной 10 и 50 нм при естественном освещении измеряемых образцов Солнцем, так и при их облучении лампой. Показано, что при естественном освещении и относительном среднеквадратическом значении шума 3% можно обеспечить

вероятность правильного обнаружения нефтяных загрязнений на земной поверхности более 82 % при вероятности ложных тревог менее 3 % .

Литература

1. Fingas M., Brown C.E. A Review of Oil Spill Remote Sensing // *Sensors* 2018. V.18. N 91. P. 1-18.
2. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
3. Оптико-физические средства исследования океана / Под ред. Е.Г. Пащенко. Л.: Судостроение, 1984. 264 с.
4. Дистанционный контроль верхнего слоя океана / Орлов В.М., Самохвалов И.В., Белов М.Л., Шаманаев В.С., Клинкин В.М., Белохвостиков А.В., Пеннер И.Э., Сафин Р.Г., Юдовский А.Б. Новосибирск: Наука. Сибирское Отделение, 1991. 149 с.
5. 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.
6. Keskin G., Teutsch C.D., Lenz A., Middelman W. Concept of an advanced hyperspectral remote sensing system for pipeline monitoring // *Proc. SPIE*. 2015. V.9644. P. 96440H-1 - 96440H-9.
7. 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.
8. Horig B., Kuhn F., Oschütz F., Lehmann F. HyMap hyperspectral remote sensing to detect hydrocarbons // *Int. J. remote sensing*. 2001. V. 22. N. 8. P. 1413–1422.
9. Kühn F., Oppermann K., Horig B. Hydrocarbon Index – an algorithm for hyperspectral detection of hydrocarbons // *International Journal of Remote Sensing*. 2004. V. 25. N. 12. P. 2467-2473.
10. 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.
11. 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.

12. Tian Q. Study on oil-gas reservoir detecting methods using hyperspectral remote sensing // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, V.XXXIX-B7. XXII ISPRS Congress. Melbourne, Australia, 2012. P. 157-162.

13. Bach Nguyen Minh, Fedotov Yu.V., Baryshnikov N.V., Belov M.L. Experimental studies of a method for detecting oil pollution on the earth's surface in the near-infrared range // Proceedings of SPIE. 2024. V. 13217. P. 132170P-1 - 132170P-6.

14. Bach Nguyen Minh, Fedotov Yu.V., Baryshnikov N.V., Belov M.L. Influence of Soil Type on the Detection of Oil Spills in the Near Infrared Range // AIP Conf. Proc. 2025. V.3268. 030016. P. 030016-1 - 030016-6.

15. Нгуен Минь Бач, Ю.В. Федотов, Н.В. Барышников, М.Л. Белов. Экспериментальные исследования влияния влажности почвы и осадков на эффективность метода обнаружения нефтяных загрязнений в ближнем ИК диапазоне // Оптика атмосферы и океан. 2025. Т. 38. N 4. С. 271-277.

16. Cooled -20°C NIR512-2.5 Spectrometer [Electronic resource]. Access mode: URL: <https://www.optosky.net/atp8000.html>. Language English (дата обращения 22.04.2025).

17. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды / В.И. Козинцев, В.М. Орлов, М.Л. Белов, В.А. Городничев, Б.В. Стрелков. М.: Из-во МГТУ, 2002. 528 с.

18. Andreoli G., Bulgarelli B., Hosgood B., Tarchi D. Hyperspectral Analysis of Oil and Oil-Impacted Soils for Remote Sensing Purposes// European commission joint Research centre. 2007. Режим доступа: https://www.ugpti.org/smartse/research/citations/downloads/Andreoli-HSI_for_Oil_and_Spills-2007.pdf (дата обращения 22.04.2025).

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

20. Brum J., Schlegel C., Chappell C., Burke M., Krekeler M.P.S. Reflective 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. N. 463. P.1-14.

СПОСОБ КОНТРОЛЯ И ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ВЫПУКЛЫХ ВЫСОКОАСФЕРИЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ

А.П. Семенов, М.А. Абдулкадыров, А.Н. Игнатов, В.Е. Патрикеев, А.Д. Тамбовский, В.

Н. Кудиков, В.В. Придня, Кудрявцев А.В., А.В. Маркин

АО «Лыткаринский завод оптического стекла» АО ЛЗОС, 140080, Лыткарино,

Московская область

E-mail: lastro@lzos.ru; <http://www.lzos.ru>

Аннотация: Проектирование и производство крупногабаритных оптико-электронных систем наземного и космического назначения требует изготовления узлов, содержащих оптические линзовые или зеркальные элементы. При изготовлении таких элементов требуется решение трех основных проблем – базирования и разгрузки оптического элемента во время обработки и эксплуатации, контроля его рабочей поверхности и формообразования до требуемой точности отклонений от заданной формы.

С развитием технологий контроля и формообразования появляется возможность создавать все более сложные поверхности оптических элементов, высокоапертурных и высокоасферических, осевых и внеосевых, что побуждает конструкторов проектировать новые, еще более сложные в изготовлении оптические элементы, которые снова требуют новых решений в производстве оптики. В этом и состоит прогресс в производстве крупногабаритной астрономической и космической оптики.

Опуская вопросы базирования и разгрузки линзы или зеркала в процессе производства и эксплуатации, рассмотрим более подробно задачи, связанные с контролем и формообразованием выпуклых оптических элементов на современном уровне.

Помимо контроля отклонений формы поверхности от требуемой, важное значение имеет центрирование асферической поверхности относительно геометрической оси оптической детали и способы измерения этого смещения для деталей полностью контролируемой с ДООЭ, а также для крупногабаритных деталей, контролируемых с дополнительным оптическим элементом, сферой Хиндла или линзой Физо.

Ключевые слова: оптика телескопов, изготовление крупногабаритной оптики, контроль крупногабаритной оптики.

METHOD OF TESTING AND SHAPING CONVEX HIGHLY ASPHERICAL SURFACES OF OPTICAL MIRRORS

A.P. Semenov, M.A. Abdulkadyrov, A.N. Ignatov, V.E. Patrikeev, A.D. Tambovskiy, V.N.

Kudikov, V.V. Pridnya, A.V. Kudryavtsev, A.B. Markin

JSC “Lytkarino Optical Glass Factory” (LZOS), Lytkarino, 140080, Moscow region

E-mail: lastro@lzos.ru; <http://www.lzos.ru>

Abstract: The design and production of large-sized optical-electronic systems for ground and space applications requires manufacturing of units containing optical lens or mirror elements. While manufacturing of such elements, it is necessary to solve three main issues: positioning and support of optical element during processing and operation, testing of its working surface and figuring up to the required deviation accuracy from a given shape.

With the development of testing and figuring technologies, it becomes possible to create increasingly complex surfaces of optical elements, both high-aperture and high-asphericity, axial and off-axis, which encourages engineers to design new, even more complex optical elements, which again require new solutions in optical production. This is exactly what makes progress in the production of large-sized astronomical and space optics.

Omitting the issues of positioning and support of a lens or a mirror during production and operation, we will consider in more detail the issues related to the up-to-date testing and figuring of convex optical elements.

In addition to testing of the deviations of surface figure from the required one, centering of aspherical surface relative to optical component geometrical axis and methods applied for measurement of this displacement for components fully tested with DOE, as well as for large components tested with an additional optical element, a Hindle sphere or a Fizeau lens, are of great importance..

Keywords: telescopes optic, optical fabrication, optical testing.

Введение

Для определения формы поверхности зеркал в настоящее время широко используются дифракционные оптические элементы (ДОЭ) или Computer Generated

Holograms (CGH) [1,2]. С их помощью выполняется контроль формы асферической поверхности детали, в том числе и внеосевой [3-6], что особенно важно на современном этапе развития технологий производства оптики, определение положения вершины асферической поверхности относительно вершины геометрической оси детали [7,8]. Точность определения децентрировки в методе с ДОЭ существенно выше всех предыдущих способов и достигает десятых долей миллиметра. Особый интерес и наибольшую сложность представляют методы контроля выпуклых асферических осевых и внеосевых поверхностей. Если для выпуклой поверхности невозможно изготовить ДОЭ такого диаметра, превышающего диаметр контролируемой поверхности, то в этом случае используется дополнительный оптический элемент – линза Физо или сфера Хиндла.

Результаты практического использования зеркал в реальных условиях в телескопах подтвердили надежность и эффективность тестирования формы поверхности и центрировки асферических поверхностей относительно образующих зеркал во время обработки, что существенно упрощает последующую юстировку всего телескопа и повышает качество изображения оптической системы.

1. Способы контроля осевых выпуклых асферических поверхностей оптических деталей и возможность применения этих схем для внеосевых поверхностей

Для точного формообразования оптических поверхностей, особенно выпуклых асферических, необходима достоверная информация об отклонениях формы поверхности от заданной. Наиболее сложный процесс контроля – контроль внеосевых выпуклых поверхностей оптических деталей.

Для осевых выпуклых асферических элементов используется метод контроля со вспомогательной сферой Хиндла большего диаметра, чем контролируемая поверхность, а также различные модификации этой схемы контроля с дополнительными оптическими элементами [9]. В классической схеме Хиндла световой пучок, выходящий из одного фокуса гиперболы, падает на контролируемую поверхность, от нее отражается расходящийся пучок с центром во втором фокусе, падает на вспомогательное сферическое зеркало по нормали к сфере, центр кривизны которой совмещен со вторым фокусом, отражается обратно и возвращается в первый фокус (рисунок 1) [10,11].

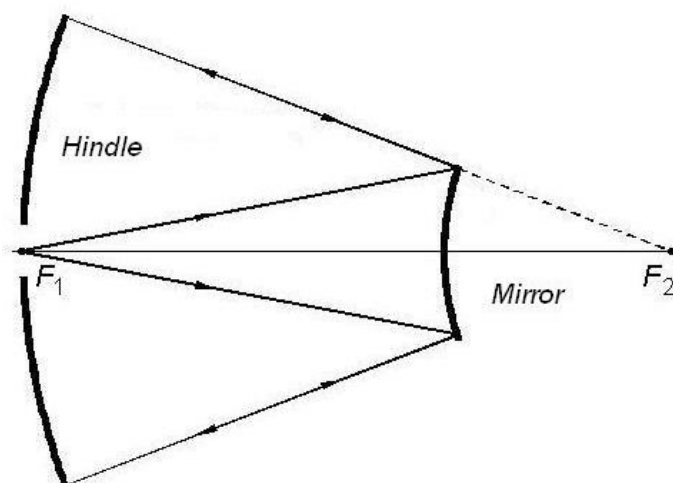


Рисунок 1 – Схема Хиндла для контроля выпуклой асферической поверхности

Теоретически данным способом можно контролировать и внеосевую поверхность, но контроль будет весьма сложным в реализации при юстировке схемы контроля.

Другой способ контроля осевого выпуклого зеркала, это контроль на проход через материал зеркала со стороны тыльной поверхности с отражением от выпуклой поверхности при проходе через материал зеркала (рисунок 2) [12]. Для компенсации aberrаций, возникающих при проходе через материал зеркала, используется либо линзовый корректор, либо корректор волнового фронта на базе дифракционного оптического элемента. Использование данного способа для контроля внеосевого зеркала также проблематично из-за сложной юстировки схемы контроля, учета неоднородности материала зеркала, которое не рассчитано, как правило, на работу в проходящем свете и т.д.

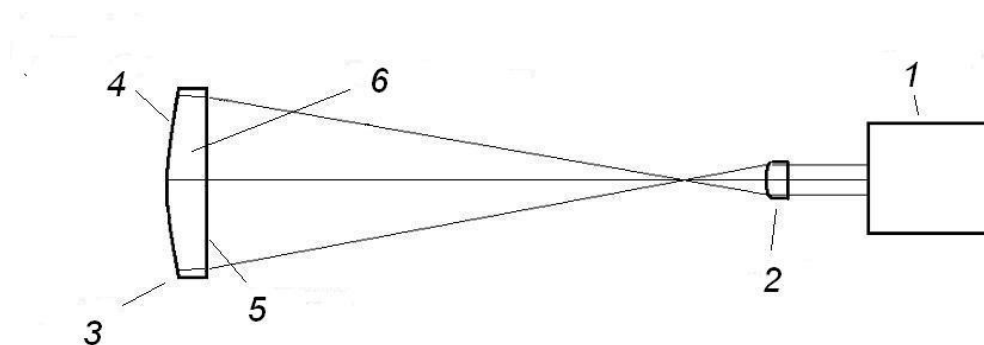


Рисунок 2 – Схема контроля выпуклой поверхности на просвет через материал оптической детали. 1- интерферометр, 2- корректор волнового фронта линзовый или ДОО, 3 – оптическая деталь, 4 – контролируемая выпуклая поверхность, 5 – передняя плоская или вогнутая поверхность, 6 – материал детали с определенной однородностью

Контроль крупногабаритной выпуклой оптики, когда невозможно изготовить дифракционный оптический элемент такого размера, требует изготовления дополнительных оптических элементов. Можно использовать способ контроля внеосевой части полной осевой поверхности детали с использованием дополнительных оптических элементов, линз, которые реализуют фактически схему Физо (рисунок 3) [13].

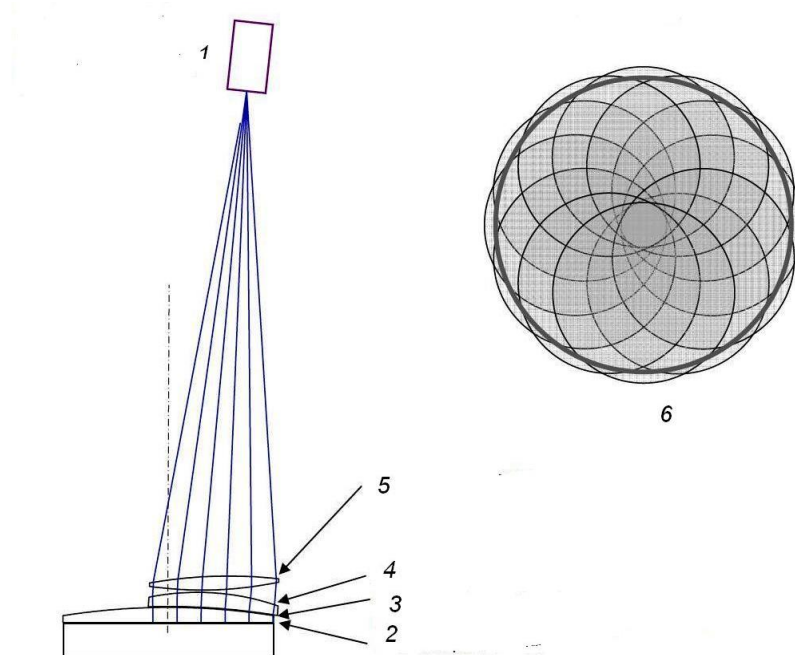


Рисунок 3 – Контроль выпуклой поверхности детали диаметром 1.7 м методом Физо с комплектом линз способом переналаживания. 1 – интерферометр, 2- контролируемая выпуклая поверхность, 3 – воздушный промежуток 6 мм, 4 - тестовая линза Физо диаметром 1 м, 5 – вспомогательная осветительная собирающая линза, 6 – картина съемок частей поверхности

В данном случае волновой фронт проходит через оптическую систему, которая на выходе имеет вогнутую асферическую поверхность, совпадающую с выпуклой асферической поверхностью контролируемой детали. Интерферометр Физо использует отражение от контрольной поверхности, которая находится всего в нескольких мм от измеряемой поверхности, волновой фронт падает по нормали к выпуклой асферической поверхности и возвращается обратно. Первая линза является осветительной (5) и не влияет на результаты измерений. В данном способе также требуется очень точная юстировка взаимного положения линз относительно контролируемой части поверхности, что усложняет достижение требуемой точности контроля формы

поверхности, кроме того, требуется изготовление двух вспомогательных линз довольно сложной конфигурации.

Практическая реализация данного метода осуществлена при изготовлении матрицы для контроля выпуклой поверхности вторичного зеркала телескопа ELT (Extremely Large Telescope) Европейской южной обсерватории (ESO, European Southern Observatory) диаметром 4 м на фирме SAGEM REOCK (Франция). Для контроля внутренней эталонной поверхности матрицы разработан и изготовлен специальный дифракционный оптический элемент (CGH) [14] (рисунок 4), на котором размещена основная дифракционная структура и вспомогательные настроечные структуры для юстировки CGH относительно рабочей поверхности матрицы. Назначение матрицы с контрольной вогнутой асферической внеосевой поверхностью – контроль в схеме Физо части (сектора) выпуклой поверхности зеркала M2 ELT.

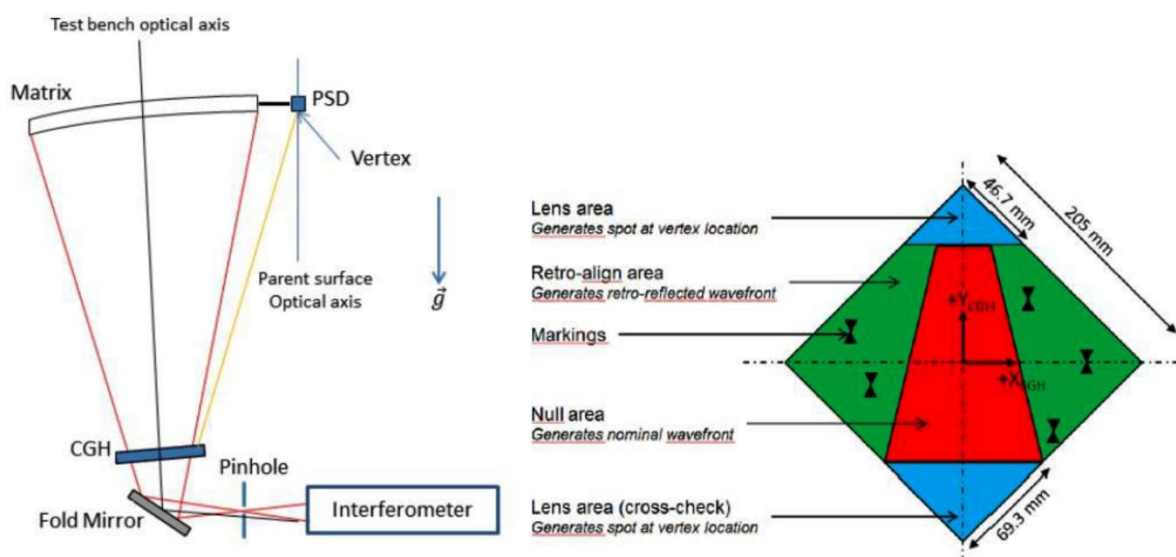


Рисунок 4 – Слева: установка испытательного стенда с интерферометром и вспомогательной оптикой. Справа: макет CGH, показывающий дифракционные зоны внутри

2. Контроль и формообразование внеосевой выпуклой асферической поверхности оптической детали с ДООЭ

В настоящее время используется способ контроля выпуклых асферических поверхностей осевых деталей с использованием дифракционных оптических элементов [8-16]. В работе [17] приведены базовые варианты схем контроля осевых асферических поверхностей для осесимметричной детали с использованием ДООЭ. При освещении ДООЭ точечным источником света на выходе его формируется сходящийся волновой

фронт, падающий по нормали к выпуклой асферической поверхности. После отражения от поверхности волновой фронт возвращается обратно в автоколлимационном ходе, формируя изображение в фокальной плоскости. Расстояние между ДОО и вершиной контролируемой выпуклой поверхности выбирается на стадии расчета ДОО минимально возможным, чтобы свести к минимуму разницу световых диаметров выпуклой асферической поверхности и ДОО.

Способ измерения формы и децентрировки асферической вогнутой внеосевой поверхности оптической детали с помощью интерферометра и ДОО описан в работах [7,8]. Аналогично был разработан метод контроля выпуклых внеосевых поверхностей с помощью интерферометра с ДОО в качестве корректора волнового фронта [18]. ДОО были изготовлены в Институте автоматики и электрометрии СО РАН (ИАиЭ СО РАН) [19-21]. В схеме рисунок 5 для контроля выпуклой асферической поверхности 1 используется в качестве корректора волнового фронта ДОО 2, который устанавливают между поверхностью 1 и интерферометром 3.

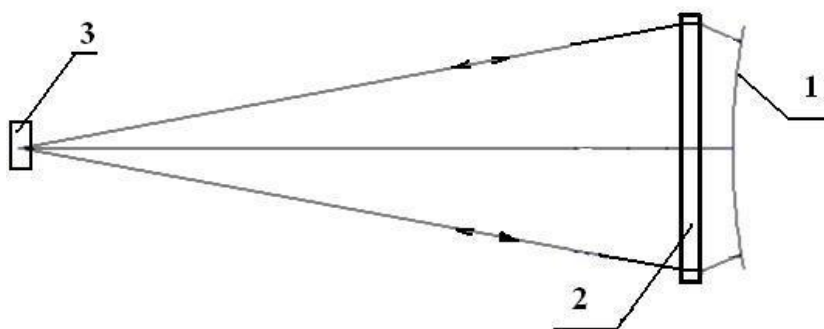


Рисунок 5 – Схема контроля

При освещении ДОО точечным источником света интерферометра 3 на выходе его формируется сходящийся волновой фронт, падающий по нормали к выпуклой асферической поверхности 1. Данное расчетное положение предварительно выставляется и замеряется в соответствие с расчетными данными (расстояние от ДОО до поверхности зеркала).

Используемый ДОО 2 состоит из оптической круглой плоскопараллельной подложки 4 (рисунок 6), на которой нанесены основная дифракционная пропускающая структура 5 и вне её дополнительные структуры – отражающие центрирующие 6 в виде четырех отрезков кольца по окружности ДОО, расположенных диаметрально противоположно, и центральной круговой зоны 7 на оси ДОО, а также четыре

фокусирующие элемента 8 по окружности ДОЭ, расположенных диаметрально противоположно между центрирующими структурами 6.

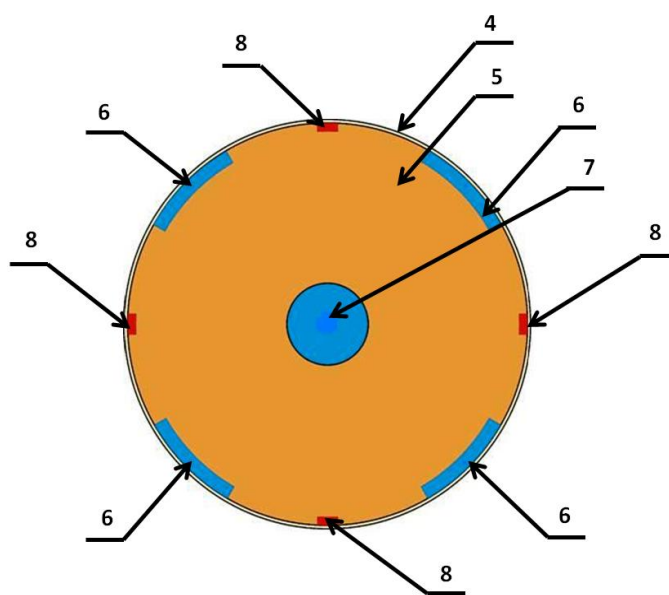


Рисунок 6 – Конструкция ДОЭ с основной и дополнительными структурами

Вначале настраивают и центрируют ДОЭ 2 в оправе относительно интерферометра 3 (рисунок 5) с помощью интерферограмм опорного волнового фронта от центрирующих структур 6 и 7 (рисунок 6), при минимальном количестве интерференционных полос, а относительно измеряемой поверхности 1 – с помощью четырех фокусирующих зон структуры 8 (рисунок 6), трансформируемых на поверхности детали в виде светящихся сфокусированных пятен в краевой области детали в заданных позициях (рисунок 8), что обеспечивает и гарантирует точность юстировки. Контролируемое зеркало 1 (рисунок 7) установлено в оправу 9 и юстируется относительно ДОЭ с интерферометром с помощью гексапода 10. Как правило, корректоры волнового фронта (что линзовые, что дифракционные) рассчитываются и изготавливаются для работы с конкретными асферическими поверхностями, при этом учитываются величина фокусного расстояния и крутизна асферики. Получают интерференционную картину, отраженную от контролируемой поверхности, в автоколлимации. Расшифровывают данную картину и строят топографическую карту отклонений данной поверхности детали от требуемой для проведения сеанса формообразования.

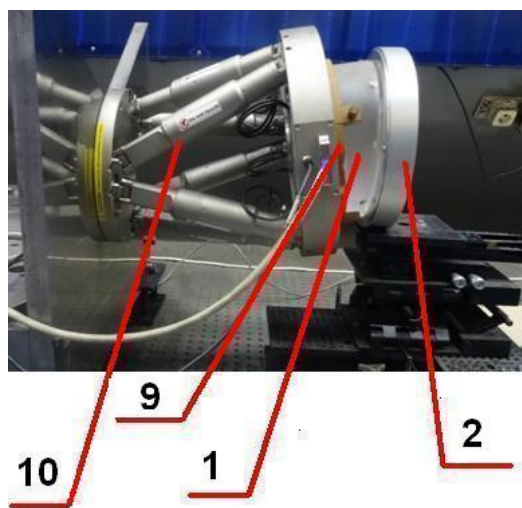


Рисунок 7 – Узел контролируемого зеркала с ДОЭ

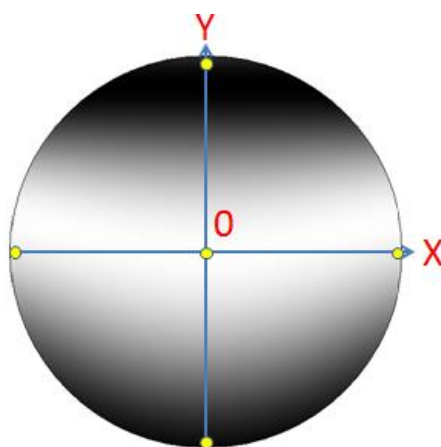


Рисунок 8 – Расположение фокусирующих точек в области поверхности детали

В качестве примера приведен контроль внеосевого зеркала диаметром 230 мм с вершинным радиусом 1200 мм, отступлением центра детали от оптической оси 184.8 мм с асферичностью 129 мкм [15]. Контроль формы поверхности выполнялся в горизонтальной схеме (рисунок 5). ДОЭ расположен на подложке диаметром 240 мм (рисунок 6), что чуть больше диаметра зеркала. Основная структура 5 расположена в зоне от 24 до 117 мм. Отражающая центрирующая структура 6 расположена в четырех областях зоны от 110 до 117 мм и в центральной зоне 7 диаметром 23.8 мм. Фокусирующие элементы 8 для установки зеркала нанесены в зоне 113-119 мм.

На рисунке 9 приведен вид ДОЭ со всеми элементами, обозначенными на рисунке 6, а на рисунке 10 фото фокусирующего элемента на ДОЭ. На рисунке 11 представлена интерферограмма на финишной стадии формообразования по которой получена карта отклонений волнового фронта, отраженного от поверхности (рисунок 12). Здесь RMS (root-mean-square) – среднеквадратичное отклонение (с.к.о) волнового

В результате применения способа контроля внеосевой асферической поверхности оптической детали с ДОЭ появилась возможность достоверного контроля, привязанного точно к координатам на поверхности, сократилось время обработки результатов контроля, а в ряде случаев формообразование внеосевых

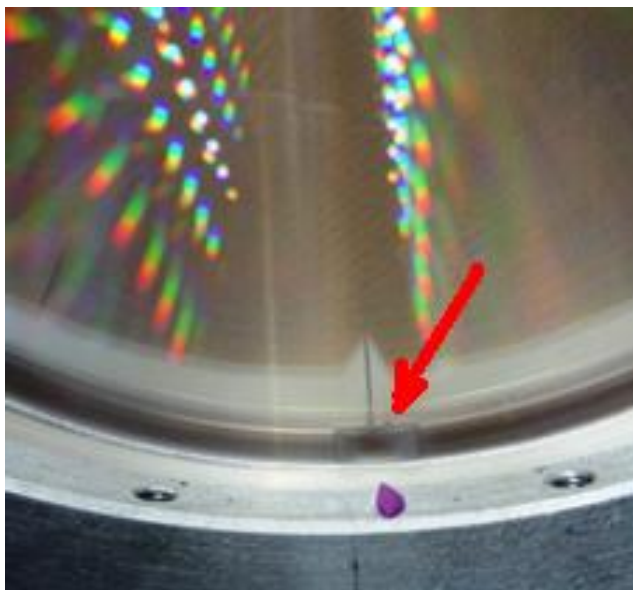


Рисунок 10 – Фокусирующий элемент 8
(рисунок 6)

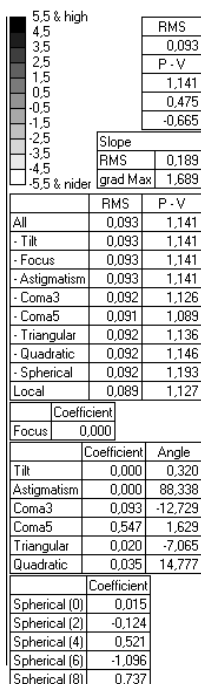


Рисунок 12 – Карта
волнового фронта отраженного
от поверхности контролируемой
детали и параметры отклонений
волнового фронта

В результате применения способа контроля внеосевой асферической поверхности оптической детали с ДОЭ появилась возможность достоверного контроля, привязанного точно к координатам на поверхности, сократилось время обработки результатов контроля, а в ряде случаев формообразование внеосевых

высокоасферичных поверхностей без данной разработки с использованием ДОО с математическим преобразованием вообще ранее не представлялось возможным. В результате мы получаем форму поверхности, пригодную для расчетов сеансов автоматизированного формообразования малым инструментом.

Способ выгодно отличается большей производительностью, ускоренным и более точным измерением формы внеосевых асферических поверхностей, т.е. он решает техническую задачу измерения формы внеосевой выпуклой асферической поверхности оптической детали.

3. Способы определения децентрировки выпуклой асферической поверхности оптической детали

При формообразовании оптических деталей с асферическими поверхностями выполняют центровку детали, чтобы оптическая вершина асферической поверхности была совмещена с требуемым геометрическим положением ее для осевой детали. Смещение оптической оси относительно требуемого положения для крупногабаритной оптической детали возникает на стадии формообразования. Формируется с заданной точностью разнотолщинность оптической детали относительно базовой поверхности, наклоны образующей поверхности, овальность образующей и цилиндричность и т.д. Все это приводит к минимизации смещения вершины асферической поверхности относительно геометрической оси оптической детали. Но чтобы измерить фактическое смещение, что требует заказчик в настоящее время, с достаточно высокой точностью в несколько миллиметров и даже в долях миллиметра, требуется создание специальных методов измерений данного смещения, поскольку в этом случае уже сама форма поверхности, полученная в результате формообразования, а именно, триангулярная кома, влияет на положение оптической вершины асферической поверхности.

Для измерения децентрировки были разработаны механические и оптические методы, которые с успехом применялись в АО ЛЗОС. Вопрос измерения смещения для вогнутых поверхностей с использованием механических и оптических методов рассмотрен в [7,8,22]. Здесь приведены результаты измерения децентрировки выпуклых асферических поверхностей.

В механическом способе, используемом в АО ЛЗОС, децентрировка асферической поверхности выполнялась путем измерения стрелок прогиба линейным трехточечным сферометром от края детали по нескольким диаметральному сечениям

[22]. Сферометр помещают последовательно вдоль радиального направления на одинаковом расстоянии от края детали в различных сечениях и по относительной разности в измеренных показаниях стрелки прогиба во взаимно противоположных направлениях определяют величину смещения оптической оси относительно геометрического центра оптической детали.

В данном способе есть ряд ограничений, которые необходимо учитывать при измерениях: образующая детали, на которую опирается сферометр, должна иметь овальность намного меньшую, чем требуемая измеряемая величина смещения, форма поверхности детали должна иметь собственные ошибки меньшие, чем погрешность измерения сферометром, чтобы ошибки поверхности детали не сказывались на результатах измерений. В процессе измерений необходимо с максимально возможной точностью сохранять направление измерений, для чего сферометр базируется за образующую детали с точностью менее 0.1 мм. Наклон сферометра к детали устраняется четвертой вспомогательной ножкой сферометра, он должен быть неизменным в процессе измерений, база сферометра должна быть максимально возможной для данной измеряемой детали, поскольку в этом случае повышается точность измерений. Метод позволяет определить заданную по техническим условиям величину смещения оптической оси, когда при перемещении сферометра на данную величину в радиальном направлении от центра детали чувствительность его позволяет зафиксировать изменения в величине стрелки прогиба. Зеркало во время проведения измерений должно находиться в разгруженном состоянии либо на технологической разгрузке, либо на штатной разгрузке, так же, как в процессе контроля формы поверхности зеркала.

Другой способ измерения смещения оптической оси осуществляется с использованием трехкоординатной машины, например КИМ-1400, с использованием лазерного трекера API Tracer III, с помощью фотограмметрического измерительного комплекса ATOS III и с помощью трехкоординатной измерительной машины Carl Zeiss Prismo ultra [24,25], когда определяется ближайшая асферическая поверхность по измеренным данным, вычисляется децентрировочная кома и по ней находится смещение вершины поверхности. Данный способ может использоваться как для вогнутой, так и для выпуклой поверхности. Во время контроля зеркало должно базироваться на системе разгрузки для получения достоверной информации при измерении формы поверхности. Но точности измерений таким способом бывает недостаточно.

Таким образом, точность измерений положения вершины оптической оси зависит от величины асферичности и градиента асферичности поверхности и от целого ряда описанных условий. Для крупногабаритных зеркал точность определения не превышает величину 1-2 мм, а то и больше, как в способе измерения децентрировки с использованием линейного трехточечного сферометра, так и в способе измерения формы поверхности на трехкоординатной машине.

Поэтому для вогнутых асферических поверхностей разработан способ контроля и определения децентрировки оптической оси с помощью дифракционных оптических элементов (ДОЭ) [7,8,23]. Согласно этому способу, измерения децентрировки оптической оси асферической поверхности в процессе ее формообразования и контроля формы выполняются с помощью интерферометра и корректора волнового фронта в виде ДОЭ с дополнительными дифракционными структурами [19-21]. Для этого сходящийся световой пучок от дополнительной фокусирующей кольцевой структуры в виде светящегося пятна совмещается с геометрическим положением вершины асферической поверхности, определяется децентрировочная кома, которая определяет децентрировку, и она устраняется при последующей доводке формы до требуемой расчетной. Децентрировочная кома определяет отступление вершины асферической поверхности от геометрического центра детали.

Если размер детали таков, что изготовить ДОЭ такого размера не представляется возможным, то для контроля используется дополнительная вспомогательная сфера или как ее называют, сфера Хиндла (рисунок 13), либо линза Физо (рис. 14) [18].

Контроль выпуклой поверхности с помощью сферы Хиндла напрямую не дает возможности с точностью в доли миллиметра получить центрировку вершины поверхности относительно центра детали. Для этой цели можно использовать ДОЭ, где волновой фронт проходит через плоскопараллельную пластину, имеющую фокусирующие дифракционные структуры.

Введение в ДОЭ кроме центрирующей дополнительной структуры еще и фокусирующей структуры позволяет просто и точно с помощью светящегося пятна, совместить вершину асферической поверхности с геометрическим центром и по интерферограмме измерить децентрировку.

Схема включает последовательно установленные лазерный интерферометр 1, например, типа Физо с эталонным объективом 2 (или неравноплечий интерферометр с эталонным сферическим зеркалом и светоделительным кубиком), дифракционный

оптический элемент (ДОЭ) 3, контролируемую поверхность 5 и эталонную сферу Хиндла 4

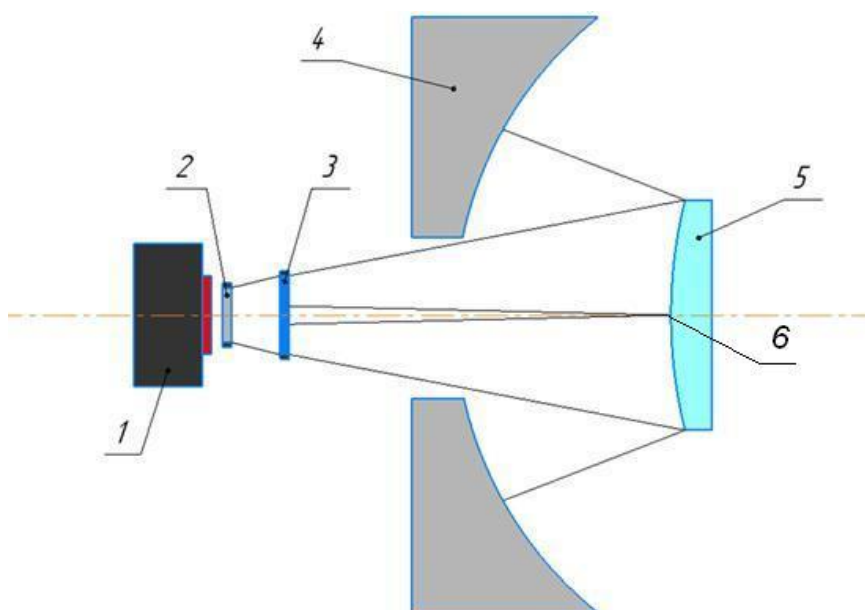


Рисунок 13 – Схема контроля выпуклого асферического зеркала со вспомогательной сферой Хиндла

Другой вариант – вместо сферы Хиндла можно использовать линзу Физо 4 (рисунок 14) совместно с ДОЭ 3. Здесь схема также включает последовательно установленные лазерный интерферометр 1 типа Физо с эталонным объективом 2 (или неравноплечий интерферометр с эталонным сферическим зеркалом и светоделительным кубиком), дифракционный оптический элемент (ДОЭ) 3, контролируемую поверхность 5 и линзу Физо 4 с эталонной вогнутой асферической поверхностью, обратной контролируемой выпуклой поверхности. Здесь расходящийся волновой фронт после ДОЭ проходит через линзу Физо, падает по нормали на контролируемую поверхность, отражается от нее и возвращается обратно.

ДОЭ корректор (рисунок 15) представляет из себя плоскопараллельную стеклянную подложку 7, через рабочую область которой 8 проходит сферический волновой фронт, падающий на контролируемую гиперболическую поверхность 5 (рис. 13, 14).

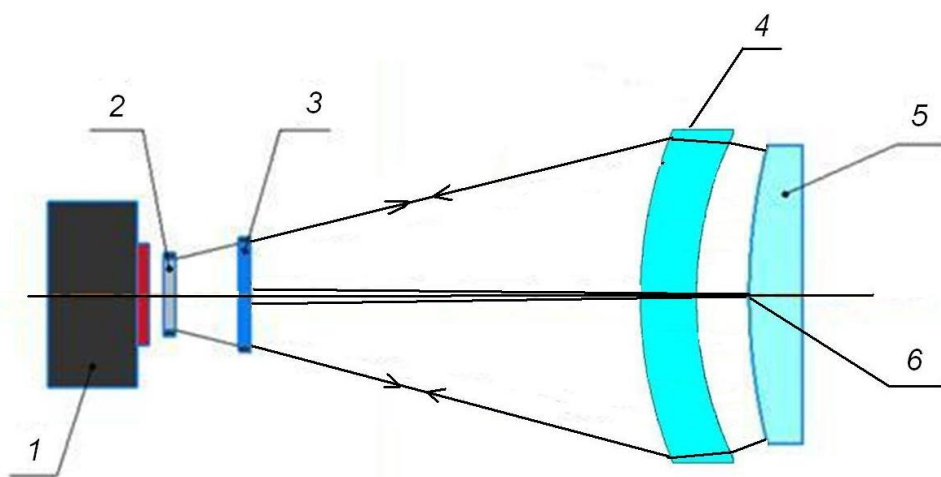


Рисунок 14 – Схема контроля выпуклого асферического зеркала со вспомогательной линзой Физо

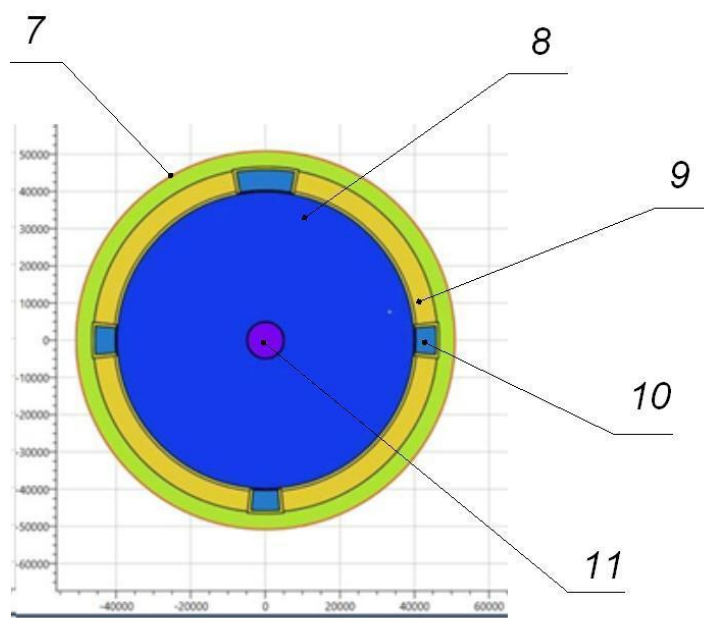


Рисунок 15 – Конструкция дифракционного оптического элемента (ДОЭ)

ДОЭ имеет настроечную дифракционную структуру 9 (рисунок 15) для юстировки интерферометра относительно ДОЭ. 10 – фокусирующие дифракционные элементы для юстировки интерферометра с ДОЭ относительно контролируемой поверхности, 11– дифракционная структура для имитации вершины зеркала.

Вначале настраивают и центрируют ДОЭ 3 относительно интерферометра 1 (рисунки 13, 14) с помощью интерферограмм опорного волнового фронта от центрирующей структуры 9 (рисунок 15). На рисунке 16 представлено положение светящихся точек вспомогательной дифракционной структуры 10 (рисунок 15) в

краевой области контролируемой детали (1, 2, 3, 4) и в ее вершине 6 (рисунки 13, 14) соответственно.

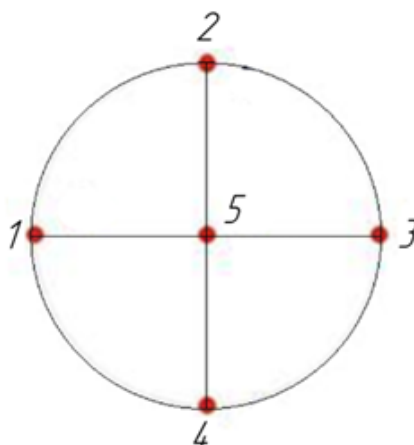


Рисунок 16 – Положение фокусирующих дифракционных элементов в области детали

По интерференционной картине от дополнительных дифракционных структур ДОЭ можно достаточно просто обеспечить контроль взаимного положения (центрировки) всех элементов оптической схемы с точностью в доли миллиметра. Необходимо, чтобы светящаяся точка (пятно) от фокусирующей структуры 11 (рисунок 15) совпадала с геометрическим центром зеркала 6 (рисунки 13, 14). Для удобства проведения этой операции в геометрическом центре, который, как правило, находится в нерабочей зоне для вторичных зеркал телескопов, можно высверлить небольшое отверстие, в которое можно загнать светящееся центрирующее пятно. Корректор, в варианте со сферой Хиндла (рисунок 13), представляет из себя плоскопараллельную пластину, пропускающую сферический волновой фронт на асферическое зеркало. Если контролируемая поверхность имеет более сложную форму поверхности (асферика более высокого порядка), или схема контроля содержит линзу Физо (рисунок 14), тогда в области 8 (рисунок 15) наносится дифракционная структура, соответствующая контролю данной асферики. Для случая варианта с линзой Физо (рис. 14) дифракционная структура в области 8 (рисунок 15) может компенсировать aberrации совместно с эталонной поверхностью линзы Физо (4, рисунок 14). Фокусирующие дифракционные структуры 10 (рисунок 15) позволяют юстировать интерферометр с ДОЭ относительно контролируемой детали 5 (рисунок 13) и относительно линзы Физо и детали 5 (рисунок 14).

С помощью основной структуры 8 ДОО проводят интерферометрический контроль формы асферической поверхности. По смещению светящейся точки от центра определяют направление и величину децентрировочной комы (рисунки 17,18).



Рисунок 17 – Модельная интерферограмма децентрировочной комы

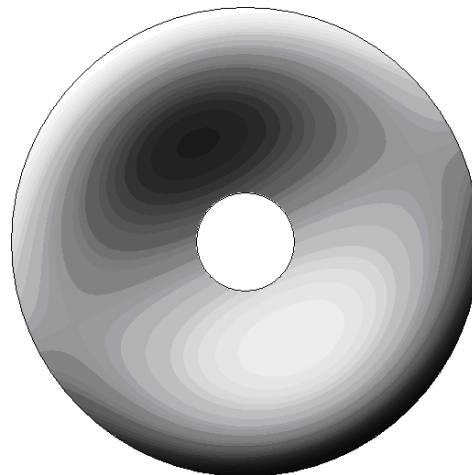


Рисунок 18 – Форма поверхности детали с децентрировочной комой

В ходе последующих сеансов формообразования и доводки децентрированной поверхности обнаруженную децентрировку устраняют, проводят окончательный ее контроль.

Указанный метод теоретически позволяет определить положение вершины зеркала с точностью порядка 300 мкм, а предложенный способ измерения и устранения децентрировки значительно эффективнее применяемых механических способов измерения с помощью сферометра и трехкоординатной машины.

Таким образом, с использованием специальных фокусирующих структур на ДОО можно не только определить смещение оптической оси относительно геометрического центра детали, но и устранить децентрировку в процессе формообразования в соответствии с требованиями спецификации.

Для экспериментальной оценки децентрировки оптической оси относительно геометрического центра на асферической детали с выпуклой поверхностью было выбрано вторичное зеркало телескопа со следующими параметрами:

- внешний световой диаметр детали = 712 мм;
- внутренний световой диаметр детали = 92 мм.

Радиус кривизны выпуклой асферической оптической поверхности при вершине $R_c = 2725,76 \text{ мм} \pm 5 \text{ мм}$. Значение R_c должно быть известно с точностью лучше $\pm 0,5 \text{ мм}$.

Коническая константа: $K = -1,738819 \pm 0,001$. Значение конической константы должно быть известно с точностью лучше $\pm 0,00017$.

Асферичность от ближайшей сферы = 41 мкм.

По результатам сравнительного анализа (таблица 1) были получены данные, представленные в таблице.

Т а б л и ц а 1 – Сравнительный анализ методов измерения децентрировки

№	Метод определения децентрировки оптического центра	Точность определения
1	Линейный трехточечный сферометр	2 мм
2	Трехкоординатная измерительная машина	1 мм
3	ДОЭ	0.1-0.2 мм

Предложенный способ промышленно применим, т.к. в нем используются стандартные оптические компоненты. Комбинированные ДОЭ стабильно изготавливают в Институте автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск.

Выражаем глубокую благодарность специалистам Института автоматики и электрометрии (ИАиЭ СО РАН, Новосибирск) за плодотворное сотрудничество и изготовление дифракционных оптических элементов.

Заключение

АО ЛЗОС использует самые современные средства контроля оптики, включая интерферометры с дифракционными оптическими элементами для выполнения высокоточного контроля оптики, определения характеристик и параметров волнового фронта с расчетом различных параметров поверхности, необходимыми для формообразования крупногабаритных поверхностей астрономических и космических зеркал, которые полностью обеспечивают метрологическое сопровождение процесса формообразования крупногабаритных оптических деталей на всех стадиях производства, от фрезерования и шлифования до полирования и финишной доводки асферических поверхностей.

Литература

1. Полещук А. Г., Маточкин А. Е. Лазерные методы контроля асферической оптики. Фотоника. 2011;2:38–44.
2. Полещук А. Г., Хомутов В. Н., Маточкин А. Е., Насыров Р. К., Черкашин В. В. Лазерные интерферометры для контроля формы оптических поверхностей. Фотоника. 2016;4: 38–50.
3. Martin H. M., Burge J. H., Cuerden B., et al. Progress in manufacturing the first 8.4 m off-axis segment for the Giant Magellan Telescope. Advanced Optical and Mechanical Technologies in Telescopes and Instrumentation. Proc. SPIE of 2008; 7018. DOI: 10.1117/12.789805.
4. Burge J. H., Kot L. B., Martin H. M., Zehnder R., Zhao C. Design and analysis for interferometric measurements of the GMT primary mirror segments. Proc. SPIE. 2006; 6273: 6273-22-16273-22-12. DOI: 10.1117/12.672484.
5. Martin H. M., Allen R. G., Burge J. H. et al. Production of primary mirror segments for the Giant Magellan Telescope. Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation. Proc. SPIE of 2014; 9151: 91510J. DOI: 10.1117/12.2057012.
6. Martin H. M., Allen R., Gasho V., et al. Manufacture of primary mirror segments for the Giant Magellan Telescope. Proc. SPIE of 2018. Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation III. 10706: 107060V. DOI: 10.1117/12.2312935
7. Семенов А.П., Абдулкадыров М.А., Патрикеев В.Е., Морозов А.Б., Насыров Р.К. Методы контроля формы осевых и внеосевых асферических поверхностей с дифракционным оптическим элементом, определением децентрировки и учетом дисторсии при их формообразовании. Часть 1. Фотоника. 2022; 16(4): 318-327. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2022.16.4.318.327
8. Семенов А.П., Абдулкадыров М.А., Патрикеев В.Е., Морозов А.Б., Насыров Р.К. Методы контроля формы осевых и внеосевых асферических поверхностей с дифракционным оптическим элементом, определением децентрировки и учетом дисторсии при их формообразовании. Часть 2. Фотоника. 2022; 16, (5): 392-402. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2022.16.5.392.402.
9. Зверев В. А., Соболев К. Ю., Цуканова Г. И. Контроль формы выпуклых несферических поверхностей вращения. Оптический журнал. 1996; 74(12): 12-19.

10. Абдулкадыров М.А., Белоусов С.П., Придня В.В., Полянщиков А.В., Семенов А.П. Оптимизация технологии формообразования и методов контроля выпуклых асферических поверхностей крупногабаритных оптических деталей. Оптический журнал. 2013; 80(4): 24-32. OCIS: 220.0220, 220.0230, 220.4610, 350.1260.
 11. Semenov A.P. Accomplished the task of production of the primary and secondary mirrors of Devasthal Optical Telescope under the project ARIES (India, Belgium, Russia): fabrication features. Proc. SPIE of 2012. Modern Technologies in Space- and Ground-based Telescopes and Instrumentation II. 8450: 84504R-1 – 84504R-14. DOI: 10.1117/12.924645.
 12. Stewart McKechnie T. Interferometric test method for testing convex aspheric mirror surfaces. Proc. SPIE of 2010. Modern Technologies in Space and Ground-based Telescopes and Instrumentation. 7739:77390Y-4. DOI: 10.1117/12.856564
 13. P J. H. Burge, P. Su, and C. Zhao. Optical metrology for very large convex aspheres. Proc. SPIE of 2008. Advanced Optical and Mechanical Technologies in Telescopes and Instrumentation. 7018: 701818-1 - 701818-12. DOI: 10.1117/12.790063
 14. Burmeister F., Ehrhardt S., Benkenstein T., et al. CGH for ESO's ELT M2 reference plate: fabrication of high precision CGHs. Proc. SPIE of 2020. Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation IV. 11451: 114510W. DOI: 10.1117/12.2562827.
 15. Invernizzi A., Lefevre A., Wullaume P., et al. ELT secondary mirror manufacturing progress at Safran Reosc. Proc. SPIE of 2020. Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation IV. 11451: 114510F. DOI: 10.1117/12.2559356.
 16. Gloesener P., Wolfs F., Cola M. et al. Optics for EUCLID telescope: challenges and developments. Proc. SPIE of 2020. Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation IV. 11451: 114510L. DOI: 10.1117/12.2562807.
 17. Ларионов Н.П., Лукин А.В., Нюшкин А.А., Ходжаев Р.Р. Контроль выпуклых асферических поверхностей с использованием осевых синтезированных голограмм. Оптический журнал. 2007; 74(6): 44-49. OCIS: 050.1970.
 18. Патент RU 2803879. Способ измерения формы внеосевой асферической оптической детали/ Семенов А.П., Патрикеев, Тамбовский А.Д., Придня В.В., Ботош З.Д.
 19. Poleshchuk A. G., Korolkov V. P., Nasyrov R. K., Asfour J.-M. Computer generated holograms: fabrication and application for precision optical testing. Proc. SPIE of 2008. 7102: 7102-1 - 7102-6. DOI: 10.1117/12.797816.
-

20. Poleshchuk A. G. Computer generated holograms for aspheric optics testing. Proc. SPIE of 2009. 7133:713333-1-713333-9. DOI: 10.1117/12.821243.
21. Poleshchuk A. G. Fabrication and application of diffractive optical elements. Proc. SPIE of 2010. 7544:75443L-1-75443L-12. DOI: 10.1117/12.887434.
22. Патент RU 2534815. Способ измерения децентрировки оптической оси асферической поверхности и сферометр для осуществления способа/ Семенов А. П., Патрикеев В. Е.
23. Патент RU № 2758928. Способ измерения децентрировки оптической оси асферической поверхности / Семенов А.П., Патрикеев В. Е., Никонов А. Б., Морозов А. Б., Насыров Р. К.
24. Семенов А.П., Игнатов А.Н., Никонов А.Б., Патрикеев В.Е., Морозов А.Б., Папаев А.Ю., Лаухин М.А., Пышнов В.Н., Ляховец А.О., Голубев Е.С., Смирнов А.В. Изготовление крупногабаритных выпуклых внеосевых матриц из астроситалла с асферичностью до 20 мм. Электронный научно-технический журнал «Контенант». 2021; 3, (3): 8-27.
25. Semenov A.P., Abdulkadyrov M. A., Ignatov A. N., Morozov A. B., Patrikeev V. E. Methods of manufacturing and certification of high-aperture aspherical matrices for forming of off-axis panels of "Millimetron" space telescope 10-m mirror Proc. SPIE of 2022. Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation V. 12188: 121882W-1- 121882W-11. DOI: 10.1117/12.2627922.

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ОТРАЖЕНИЯ ПОРОД ДЕРЕВЬЕВ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РФ В ВИДИМОМ И БЛИЖНЕМ ИНФРАКРАСНОМ СПЕКТРАЛЬНЫХ ДИАПАЗОНАХ В ПЕРИОД НАЧАЛА ЛЕТА

А.А. Шкарупило, М.Л. Белов, С.Е. Иванов, Ю.В. Федотов, Н.В. Барышников

Аннотация: Проведены исследования спектров отражения листьев и хвои деревьев, характерных для Европейской части Российской Федерации, в период конца весны и начала лета в видимом и ближнем инфракрасном спектральных диапазонах. Измерения спектров отражения образцов листьев и хвои березы, дуба, клена, липы, осины, ели, сосны проводились на лабораторной установке в диапазоне 0,4 -1 мкм со спектральным разрешением 2 нм. Для каждой породы деревьев было измерено 150 образцов спектров отражения. Показано, что для спектров отражения листьев разброс измеренных значений небольшой – единицы процентов. Для спектров хвои разброс измеренных значений больше – до $\sim 10\%$. Для классификации пород деревьев по спектрам отражения использовалась одномерная сверточная нейронная сеть 1D-AlexNet. Результаты математического моделирования показывают, что в период конца весны и начала лета измеренные спектры отражения в диапазоне 0,4-1 мкм с разрешением 2 нм позволяют эффективно проводить классификацию пород деревьев. При относительном среднеквадратическом значении шума измерения 5% потенциально возможно обеспечить вероятности правильной классификации березы, дуба, клена, липы, осины, ели, сосны в диапазоне $\sim 92 - 100\%$ при вероятностях неправильной классификации этих пород деревьев в диапазоне $\sim 0 - 8\%$.

Ключевые слова: спектры отражения листьев, спектры отражения хвои, видимый спектральный диапазон, ближний инфракрасный спектральный диапазон, классификация, одномерная сверточная нейронная сеть.

A STUDY OF THE TREE SPECIES REFLECTION SPECTRA IN THE EUROPEAN PART OF THE RUSSIAN FEDERATION IN THE VISIBLE AND NEAR-INFRARED SPECTRAL RANGES DURING THE EARLY SUMMER PERIOD

A.A. Shkarupilo, M.L. Belov, S.E. Ivanov, Y.V. Fedotov, N.V. Baryshnikov

Abstract: The reflectance spectra of leaves and needles from tree species typical of the European part of the Russian Federation were studied in the late spring and early summer periods within the visible and near-infrared spectral ranges. The reflectance spectra of leaf and needle samples from birch, oak, maple, linden, aspen, spruce, and pine were measured using a laboratory setup over the 0.4–1.0 μm range with a spectral resolution of 2 nm. For each tree species, 150 reflectance spectrum measurements were taken. It was shown that for the leaf reflectance spectra, the spread of the measured values is small, amounting to a few percent. For the needle spectra, the spread is larger, up to $\sim 10\%$. For the classification of tree species based on their reflectance spectra, a one-dimensional convolutional neural network, the 1D-AlexNet, was used. The results of mathematical modeling demonstrate that during the late spring and early summer period, the measured reflectance spectra in the 0.4–1.0 μm range with a 2 nm resolution enable effective classification of tree species. Given a relative root mean square (RMS) measurement noise level of 5%, the correct classification probabilities for birch, oak, maple, linden, aspen, spruce, and pine range from $\sim 92\%$ to 100%, while the probabilities of misclassification for these species range from $\sim 0\%$ to 8%.

Keywords: leaf reflectance spectra, needle reflectance spectra, visible spectral range, near-infrared spectral range, classification, one-dimensional convolutional neural network.

Введение

Леса планеты выполняют множество экологических (климатообразующих, водоохранных и т.д.), экономических, социальных и других важнейших функций. Это обуславливает актуальность задачи мониторинга состояния лесных экосистем в различных регионах мира (см., например, [1,2]).

Использование аэрокосмических (мультиспектральных и гиперспектральных) данных зондирования о лесных массивах в видимом и ближнем инфракрасных спектральных диапазонах дает возможность проводить дистанционный мониторинг состояния лесов (см., например, [3-7]).

Первым этапом работы по получения объективных аэрокосмических данных о состоянии лесных массивов в конкретном регионе является создание банка данных спектров отражения древесной растительности.

В банке данных должны содержаться спектры отражения лесной растительности в разные периоды вегетации. Причем величины спектральной отражательной способности в банке данных не должны зависеть от условий освещения

во время проведения измерений (определяться как отношение яркости от образца лесной растительности к яркости от эталонного отражателя при тех же условиях освещения).

Вопросам классификации пород деревьев по данным аэрокосмического оптического зондирования в спектральном диапазоне 0,4-2,4 мкм посвящено большое количество работ (см., например, [8-14]).

Однако, для массового использования методов оптического зондирования в лесном хозяйстве на региональном уровне перспективно применение легких и наиболее дешевых беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) (см., например, [15-18]).

Поэтому актуальным является вопрос о эффективности использования для региональных задач лесного хозяйства спектрометров более узкого спектрального диапазона 0,4 – 1 мкм с более простой и дешевой аппаратурой и с меньшими массо-габаритными характеристиками.

В работе [19,20] приводятся результаты экспериментальных исследований в диапазоне 0,4-1 мкм спектров отражения пород деревьев, характерных для Европейской части Российской Федерации, измеренных в периоды конца лета (август) и начала осени (начало сентября – начало октября).

Показано, что спектральные данные (коэффициенты спектральной яркости), полученные с разрешением аппаратуры ~ 2 нм, позволяют эффективно проводить классификацию пород деревьев в узком спектральном диапазоне 0,4-1 мкм (а не в широком спектральном диапазоне 0,4-2,4 мкм).

В настоящей работе приведены результаты измерений спектров пород деревьев, характерных для Европейской части РФ в период конца весны и начала лета (18 мая по 22 июня 2025 года). Показаны результаты работы одномерной сверточной нейронной сети по классификации (по спектрам отражения) пород деревьев (береза, дуб, клен, липа, осина, ель, сосна) в этот период года.

Лабораторная установка для измерения спектров отражения листьев и хвои деревьев

Измерения спектров отражения листьев и хвои пород деревьев, характерных для Европейской части РФ, проводились на лабораторной установке.

Основным блоком лабораторной установки является спектрометр OPTOSKY АТР2000Р, регистрирующий спектр с разрешением ~ 2 нм в диапазоне 200-1100 нм [19, 21].

На установке измерялся коэффициент спектральной яркости (отношение яркости, регистрируемой от образца листьев или хвои, к яркости, регистрируемой от эталонного отражателя при тех же условиях освещения). Регистрировались данные после усреднения по 100 измерениям спектрометра. При измерениях спектров отражения образцы листьев и хвои помещались на подложку, покрашенную черной краской с коэффициентом отражения, не превышающим 0,07 в спектральном диапазоне 0,4-1 мкм.

Для измерения использовались образцы листьев березы, дуба, клена, осины и липы и хвои ели и сосны, срезанных в лесном массиве около г. Пушкино Московской области.

Образцы листьев и хвои срезались разных деревьев и разных веток (одной породы). Для каждого образца листьев и хвои снимались 30 спектров в разных точках образца. Всего для каждой породы деревьев было измерено 150 образцов спектров отражения.

Срезанные образцы листьев и хвои доставлялись в лабораторию в переносном холодильнике в регулируемой температурой.

Время между срезанием образца листьев или хвои и проведением измерений не превышало 1 часа. По нашим данным [22] это было вполне достаточно, чтобы спектры отражения срезанных образцов практически не менялись.

На рисунках 1-4 показаны спектры отражения листьев и хвои деревьев в период измерения. Сплошные линии на рисунках – средние (по всем спектрам данной породы) значения спектров отражения, тонкие линии – средние значения спектров \pm - среднеквадратические отклонения значений спектров.

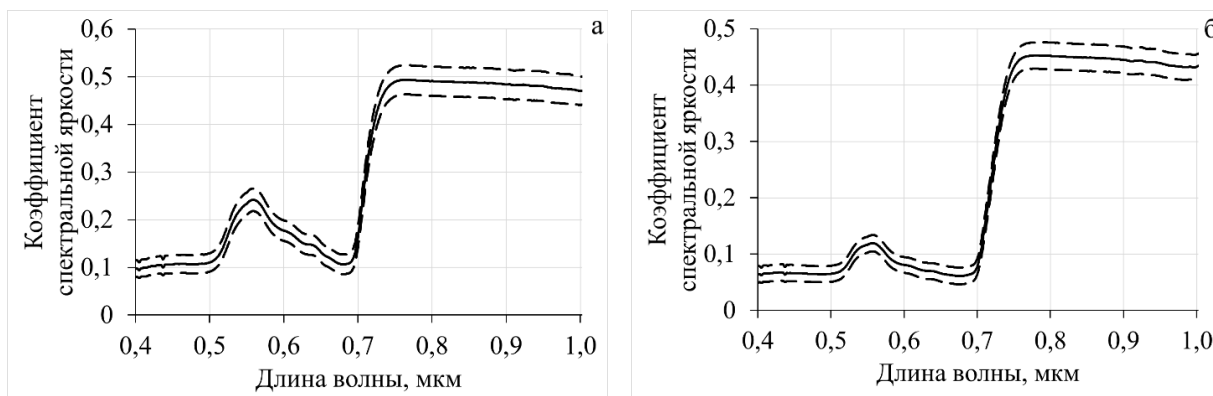


Рисунок 1 – Спектры отражения: *а* – березы; *б* – дуба

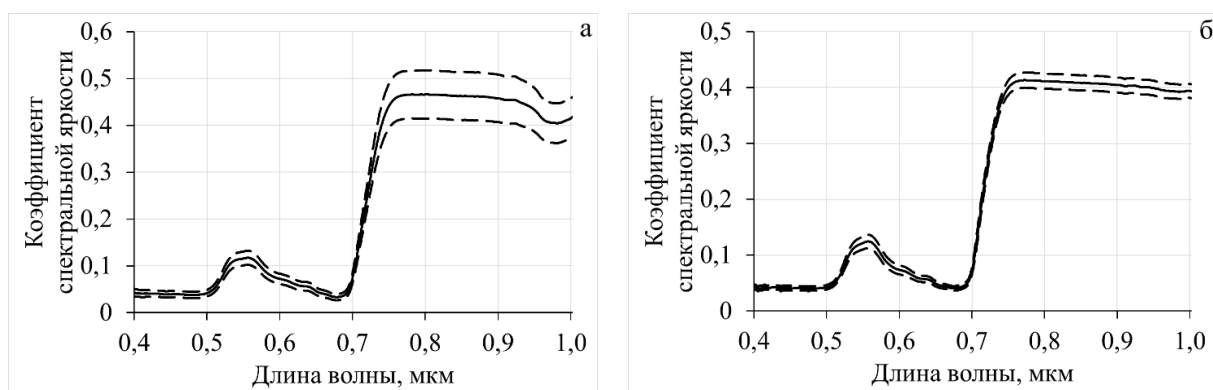


Рисунок 2 – Спектры отражения: *а* – ели; *б* – американского клена

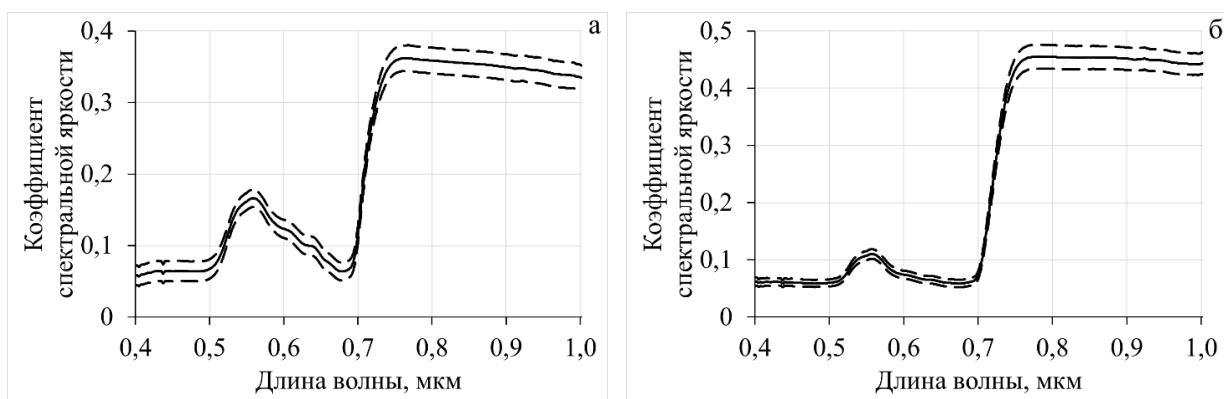


Рисунок 3 – Спектры отражения: *а* – клена; *б* – липы

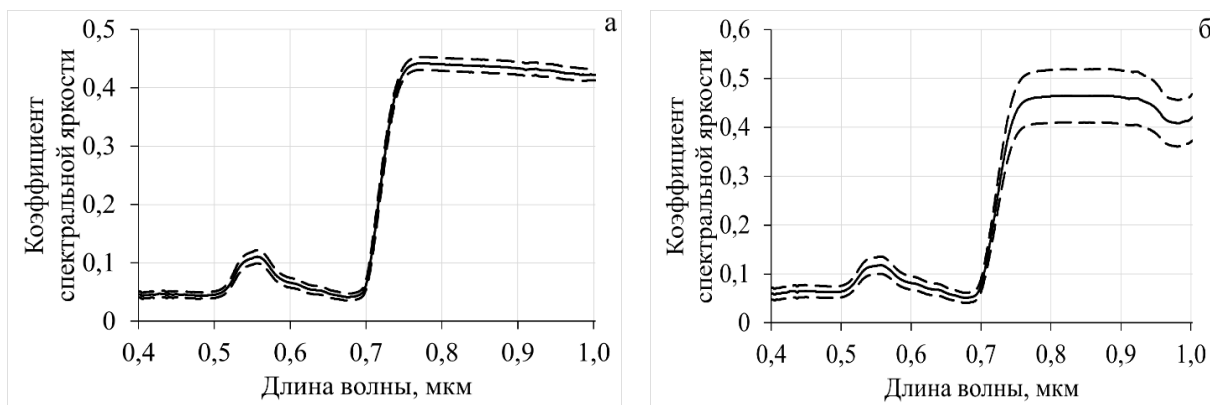


Рисунок 4 – Спектры отражения: *а* – осины; *б* – сосны

Из рисунков видно, что для спектров листьев разброс измеренных значений небольшой – единицы процентов. Для спектров хвои разброс измеренных значений больше – до $\sim 10\%$, что согласуется с данными [23].

Для оценки эффективности классификации пород деревьев в период измерения (18 мая – 22 июня) проводилось математическое моделирование.

Оценка эффективности классификации пород деревьев по спектрам отражения листьев и хвои деревьев

Для классификации лесных пород использовалась одномерная сверточная нейронная сеть 1D-AlexNet (см., например, [24]).

При обучении нейронной сети использовался оптимизатор модели Adam. Для обучения использовалась 80% измеренных спектров отражения для каждой породы (которые выбирались случайным образом), 20% измеренных спектров отражения использовалась для проверки работы нейронной сети.

Для классификации пород деревьев было использовано по 150 спектров отражения каждой породы: береза, дуб, клен, липа, осина, ель, сосна.

На этапе тестирования на вход нейронной сети подавались измеренные коэффициенты спектральной яркости с добавлением аддитивного шума, имитирующего шум измерительной аппаратуры. Шум измерительной аппаратуры полагался распределенным по нормальному закону с нулевым средним значением и относительным СКО $\delta=1-10\%$. На выходе нейронной сети формировались оценки вероятности правильной классификации P_d (правильного определения породы дерева

по его спектру отражения) и неправильной классификации P_a (неправильного определения породы дерева по его спектру отражения).

В таблицах 1-3 приведены матрицы средних (по 1000 реализаций шума измерения) значений оценок вероятностей правильной и неправильной классификации пород деревьев по их спектрам отражения для СКО шума измерения 1, 5 и 10%. В таблицах породы, перечисленные в первой строке таблицы, - это действительные породы дерева, а породы, перечисленные в первом столбце таблицы, – это породы деревьев, определенные по спектру отражения исследуемого образца. По диагонали матрицы стоят полученные оценки вероятностей правильной классификации пород деревьев.

Т а б л и ц а 1 – Матрица значений оценок вероятностей P_d и P_a для СКО шума 1%.

псo\п	береза	дуб	ель	клен	липа	осина	сосна
береза	>0,99	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
дуб	<0,01	0,91	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,03
ель	<0,01	<0,01	>0,99	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
клен	<0,01	<0,01	<0,01	>0,99	<0,01	<0,01	<0,01
липа	<0,01	0,03	<0,01	<0,01	>0,99	<0,01	<0,01
осина	<0,01	0,03	<0,01	<0,01	<0,01	>0,99	<0,01
сосна	<0,001	0,03	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,97

Т а б л и ц а 2 – Матрица значений оценок вероятностей P_d и P_a для СКО шума 3%.

псo\п	береза	дуб	ель	клен	липа	осина	сосна
береза	0,97	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
дуб	<0,01	0,74	<0,01	<0,01	0,03	<0,01	0,04
ель	<0,01	<0,01	>0,99	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
клен	0,03	<0,01	<0,01	>0,99	<0,01	<0,01	<0,01
липа	<0,01	0,10	<0,01	<0,01	0,90	<0,01	<0,01
осина	<0,01	0,08	<0,01	<0,01	0,07	>0,99	<0,01
сосна	<0,01	0,08	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,96

Таблица 3 – Матрица значений оценок вероятностей P_d и P_a для СКО шума 5%.

псо\п	береза	дуб	ель	клен	липа	осина	сосна
береза	>0,99	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
дуб	<0,01	0,76	<0,01	<0,01	0,11	0,08	0,03
ель	<0,01	0,03	>0,99	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
клен	<0,01	<0,01	<0,01	>0,99	<0,01	<0,01	<0,01
липа	<0,01	0,07	<0,01	<0,01	0,78	<0,01	<0,01
осина	<0,01	0,07	<0,01	<0,01	0,11	0,92	<0,01
сосна	<0,01	0,07	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,97

Таблицы 1-3 показывают, что в период конца весны и начала лета данные измерений коэффициентов спектральной яркости в видимом и ближнем инфракрасном спектральном диапазоне 0,4-1 мкм с разрешением 2 нм позволяют эффективно проводить классификацию семи пород деревьев.

При относительном среднеквадратическом значении шума измерения 5% потенциально возможно обеспечить вероятности правильной классификации березы, дуба, клена, липы, осины, ели, сосны в диапазоне ~ 92 – 100% при вероятностях неправильной классификации этих пород деревьев в диапазоне ~ 0 - 8%.

Результаты работы созданной нейронной сети показывают перспективность использования спектральной аппаратуры в диапазоне 0,4-1 мкм с разрешением 2 нм для задач классификации пород лиственных и хвойных деревьев, характерных для Европейской части Российской Федерации.

Выводы

Проведены исследования спектров отражения листьев и хвои деревьев, характерных для Европейской части Российской Федерации, в период конца весны и начала лета в видимом и ближнем инфракрасном спектральных диапазонах. Измерения спектров отражения образцов листьев и хвои березы, дуба, клена, липы, осины, ели, сосны проводились на лабораторной установке в диапазоне 0,4 -1 мкм со спектральным разрешением 2 нм. Для каждой породы деревьев было измерено 150 образцов спектров отражения. Показано, что для спектров отражения листьев разброс измеренных значений небольшой – единицы процентов. Для спектров хвои разброс измеренных значений больше – до ~ 10%. Для классификации пород деревьев по спектрам отражения использовалась одномерная сверточная нейронная сеть 1D-AlexNet.

Результаты математического моделирования показывают, что в период конца весны и начала лета измеренные спектры отражения в диапазоне 0,4-1 мкм с разрешением 2 нм позволяют эффективно проводить классификацию пород деревьев. При относительном среднеквадратическом значении шума измерения 5% потенциально возможно обеспечить вероятности правильной классификации березы, дуба, клена, липы, осины, ели, сосны в диапазоне ~ 92 – 100% при вероятностях неправильной классификации этих пород деревьев в диапазоне ~ 0 - 8%.

Литература

1. 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.
2. Boreal Forests in the Face of Climate Change / Ed. Girona M.M., Morin H., Gauthier S., Bergeron Y. 2023. Springer. Geneva, Switzerland. 859 p.
3. White J.C., Coops N.C., Wulder M.A., Vastaranta M., Hilker T., Tompalski P. Remote Sensing Technologies for Enhancing Forest Inventories : A Review // Can. J. Remote Sens. 2016. V.42. P. 619–640.
4. 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.
5. 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 Sens. 2020. V. 12. P.1-43.
6. Lister A.J., Andersen H., Frescino T., Gatzolis D., Healey S., Heath L.S., Liknes G.C., McRoberts R., Moisen G.G., Nelson M., Riemann R., Schleeweis K., Schroeder T.A., Westfall J., Wilson B.T. Use of Remote Sensing Data to Improve the Efficiency of National Forest Inventories: A Case Study from the United States National Forest Inventory // Forests. 2020. V.11. P.1-41.
7. John E., Bunting P., Hardy A., Silayo D.S., Masunga E. A. Forest Monitoring System for Tanzania // Remote Sens. 2021. V.13. P.1-29.
8. 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.
9. 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. V.10. 1419. P.1-21.
 10. 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. P. 1-13.
 11. Joongbin Lim, Kyoung-Min Kim, Eun-Hee Kim, Ri Jin. Machine Learning for Tree Species Classification using Sentinel-2 Spectral Information, Crown Texture, and Environmental Variables // Remote Sens. 2020, 12, 2049. P. 2049-1 – 2049-21.
 12. Dadon A., Mandelmlch 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.
 13. Axelsson A., Lindberg E., Reese H., Olsson H. Tree species classification using Sentinel-2 imagery and Bayesian inference // International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation. 2021. 100. 102318. P. 102318-1 – 102318-7.
 14. Yel S.G., Gormus E.T. Exploiting hyperspectral and multispectral images in the detection of tree species: A review // Front. Remote Sens. 2023. V. 4(1136289). P. 1–13.
 15. Zmarz A. UAV – a useful tool for monitoring woodlands // Miscellanea geographica – regional studies on development. 2014. V. 18. N. 2. P. 46-52.
 16. Michez A., Piégay H., Lisein J., Claessens H., Lejeune P. Classification of Riparian Forest Species and Health Condition Using Multi-Temporal and Hyperspatial Imagery from Unmanned Aerial System // Environmental Monitoring and Assessment. 2016. V.188 (3). P. 1–19.
 17. Dainelli R.; Toscano P.; Di Gennaro S.F.; Matese A. Recent Advances in Unmanned Aerial Vehicle Forest Remote Sensing—A Systematic Review. Part I: A General Framework // Forests. 2021. 12. 327. P.1-27.
 18. Ecke S.; Dempewolf J.; Frey J.; Schwaller A.; Endres E.; Klemmt H.-J.; Tiede D.; Seifert T. UAV-Based Forest Health Monitoring: A Systematic Review // Remote Sens. 2022. 14. 3205. P. 1-45.
 19. Федотов Ю.В., Иванов С.Е., Белов М.Л., Белов А.М., Городничев В.А., Чумаченко С.И., Шкарупило А.А. Исследование возможностей классификации пород деревьев в спектральном диапазоне 0,4–1 мкм // Светотехника. 2024. № 2. С. 62-67.

20. 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.
21. Popular UV-Vis vs USB2000+. URL: <https://www.optosky.net/atp2000p.html>.
22. Ivanov S. E., Fedotov Yu. V., Belov M. L., Gorodnichev V. A., Shkarupilo A. A. Investigation of the woody vegetation spectra dependence on the measurement conditions // Proc. SPIE. 2023. 12780, 127802P. P. 127802P-1 - 27802P-5.
23. Ivanov S. E., Fedotov Yu. V., Belov M. L., Gorodnichev V. A. Experimental study of variations in the reflection spectra of leaves and needles depending on the conditions for obtaining samples // E3S Web of Conferences. 2024. 486, 07016. P. 1-6.
24. Xie S., Ren G., Zhu J. Application of a new one-dimensional deep convolutional neural network for intelligent fault diagnosis of rolling bearings // Science Progress. 2020. V. 103(3). P. 1–18.

**АЛГОРИТМЫ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ И
ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОГО РАСПОЗНАВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ ОПЕРАТОРОМ**

Вязовых М.В., Козырев В.Д., Ковтун А.А., Соколовский В.А.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва
E-mail: maxvyaz@bmstu.ru, kozyrev_vd@bmstu.ru, kovtun@bmstu.ru, vays@bmstu.ru

Аннотация: В статье рассматриваются методы комплексирования телевизионных (ТВ) и тепловизионных (ТПВ) изображений для повышения эффективности мультиспектрального распознавания объектов оператором. В качестве критерия информативности выбран контраст изображения. Проведён сравнительный анализ наиболее распространённых алгоритмов комплексирования, включая методы сложения, преобразований Фурье и косинусного преобразования, вейвлет-преобразования, порогового сравнения и линейной регрессии. Наилучшие результаты показали методы порогового комплексирования и линейной регрессии. В работе предложен новый комбинированный алгоритм, основанный на их линейной комбинации, что позволило достичь высокого уровня контраста при сохранении высокой скорости обработки. Экспериментальная часть реализована в среде Python 3.9 с использованием библиотеки OpenCV.

Ключевые слова: комплексирование изображений, телевизионное изображение, тепловизионное изображение, мультиспектральное распознавание, линейная регрессия, пороговое сравнение, вейвлет-преобразование, дискретное косинусное преобразование, повышение контраста.

**ALGORITHMS FOR FUSION OF TELEVISION AND THERMAL INFRARED
IMAGES TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF OPERATOR MULTISPECTRAL
OBJECT RECOGNITION**

Vyazovych M.V., Kozyrev V.D., Kovtun A.A., Sokolovsky V.A.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow

Abstract: This paper addresses image fusion methods for visible (VIS) and infrared (IR) images aimed at enhancing the efficiency of operator-based multispectral object recognition. Image contrast is chosen as the primary criterion of informativeness. A comparative analysis of widely used fusion algorithms is presented, including simple addition, Fourier and discrete cosine transform (DCT)–based methods, wavelet-based fusion, threshold comparison, and linear regression. The best results were obtained using threshold-based fusion and linear regression. A novel combined algorithm based on their linear combination is proposed, which achieves a high contrast level while maintaining fast processing speed. The experimental study was implemented in Python 3.9 using the OpenCV library.

Keywords: image fusion, visible image, infrared image, multispectral recognition, linear regression, threshold comparison, wavelet transform, discrete cosine transform, contrast enhancement.

Введение

В последние годы наблюдается устойчивый рост интереса к мультиспектральным системам технического зрения, что связано с расширением спектра их практического применения в промышленности, медицине, безопасности и для поиска пропавших. Одной из ключевых задач таких систем остаётся надёжное обнаружение и точное распознавание объектов в сложных условиях наблюдения. Традиционный анализ изображений, полученных только в одном спектральном диапазоне, зачастую оказывается недостаточным, поскольку отдельный канал не всегда содержит полную и достоверную информацию о характеристиках сцены.

Для преодоления этих ограничений всё большее внимание уделяется технологиям комплексирования изображений, в частности объединению данных телевизионного (ТВ) и тепловизионного (ТПВ) диапазонов. Такой подход позволяет одновременно использовать структурные особенности видимого изображения и температурные контрасты теплового поля. В результате оператор получает более информативное изображение с повышенной визуальной чёткостью и контрастностью, что существенно увеличивает вероятность успешного распознавания объектов.

В настоящей работе рассматриваются алгоритмы предобработки и комплексирования ТВ и ТПВ кадров, направленные на улучшение распознавательных

характеристик мультиспектральных систем. Особое внимание уделено сравнительному анализу различных методов и выбору оптимальных стратегий объединения изображений, обеспечивающих баланс между качеством результата и вычислительной эффективностью.

Постановка задачи

Для корректного выполнения процедуры комплексирования необходимо наличие синхронной записи с двух каналов наблюдения – телевизионного и тепловизионного. При этом критически важно обеспечить согласование полей зрения камер и минимизировать параллакс между ними. В случае, если идеальное аппаратное совмещение невозможно, могут быть применены программные методы нормализации изображений. Такие алгоритмы позволяют устранить линейные сдвиги по горизонтали и вертикали, скорректировать параллакс, а также компенсировать геометрические искажения. Однако использование подобных методов сопряжено с ростом вычислительной нагрузки, что ограничивает их применимость в условиях автономных или ресурсно-ограниченных систем.

В данной работе предварительное согласование ТВ и ТПВ кадров было выполнено до проведения экспериментов, что позволило сосредоточиться на исследовании непосредственно методов комплексирования. Так как результирующее изображение предназначено преимущественно для визуального анализа оператором (в то время как нейросетевые алгоритмы, как правило, обрабатывают ТВ и ТПВ каналы отдельно), в качестве основного критерия эффективности комплексирования целесообразно использовать контраст итогового изображения. Известно, что человеческий глаз извлекает наибольший объём информации именно из высококонтрастных изображений [1]. В настоящей работе под контрастом K будем понимать следующую величину (1):

$$K = \sqrt{\frac{4}{MN} \sum_i \sum_j (I[i, j] - \bar{I}_0)^2} \quad (1)$$

где $\bar{I}_0 = \frac{1}{MN} \sum_i \sum_j I[i, j]$ – средняя яркость изображения; $I[i, j]$ – яркость пикселя изображения с номером i по горизонтали, j по вертикали; $i = 0 \dots M-1$; $j = 0 \dots N-1$; M – ширина изображения в пикселях; N – высота изображения в пикселях.

Данное выражение принимает значение от 0 до 1 и учитывает контраст в горизонтальном и вертикальном направлении, а также по диагонали. В качестве

исходных изображений для эксперимента возьмём тестовые пары картинок из открытых источников. Все изображения приведены к одинаковому масштабу и разрешению 640x480 пикселей с помощью интерполяционных методов.

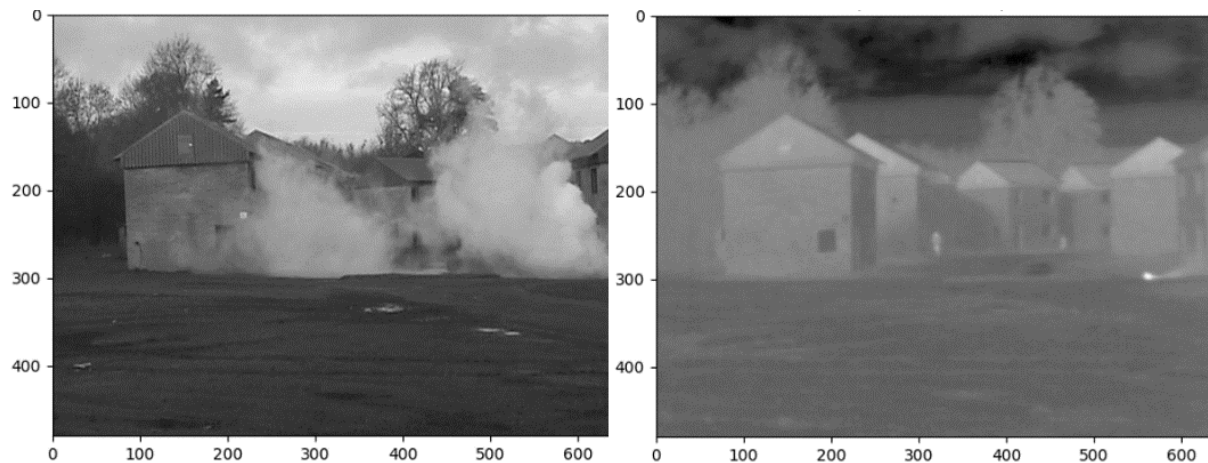


Рисунок 1 – Первая пара исходных изображений ТВ и ТПВ каналов

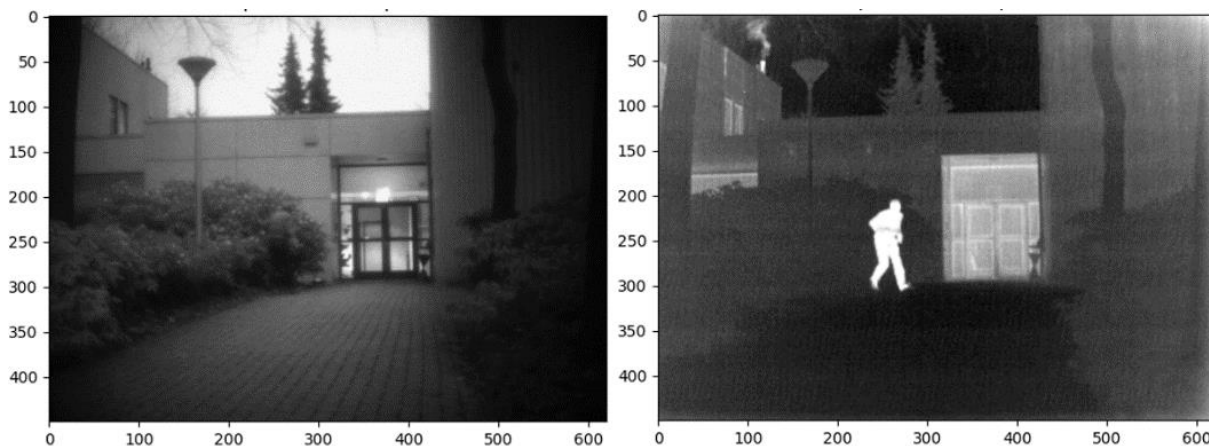


Рисунок 2 – Вторая пара исходных изображений ТВ и ТПВ каналов

Обзор алгоритмов методов комплексирования

В качестве наиболее информативного изображения из пары ТВ и ТПВ изображений в данной работе предлагается использовать изображение с наибольшим контрастом.

Наиболее эффективные и используемые современные алгоритмы комплексирования приведены в статьях [1-6]. Среди них можно выделить следующие:

- 1) Сложение ТВ и ТПВ изображений с нормировкой.
- 2) Метод «шахматной доски» со сглаживанием гауссовым фильтром.
- 3) Комплексирование с чередованием строк с последующим сглаживанием.
- 4) Фурье комплексирование на основе пирамиды Лапласа.

- 5) DCT комплексирование на основе пирамиды Лапласа.
- 6) Пороговое комплексирование.
- 7) Комплексирование линейной регрессией.
- 8) Вейвлет комплексирование.

Алгоритмы методов сложение с нормировкой, шахматной доски и комплексирования с чередованием строк описаны в статье [2].

В методе шахматной доски для сглаживания оптимально использовать гауссов фильтр 3x3 для устранения ряби, вызывающей неприятные визуальные ощущения у оператора:

$$h_2 = \frac{1}{16} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix}.$$

В методе комплексирования с чередованием строк для более эффективного сглаживания после комплексирования используется фильтр со специальной маской:

$$h_3 = \frac{1}{12} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix}.$$

Фурье и DCT комплексирование

В задачах комплексирования эффективно себя проявляют декомпозиционные методы. Общий алгоритм работы подобных методов приведён на рисунке 2. Методы 4 и 5 реализованы похожим образом, за исключением декомпозиционного преобразования: в методе 4 дискретное Фурье преобразование, в 5 дискретное косинусное преобразование.

От ТВ и ТПВ изображения берётся дискретное декомпозиционное преобразование. Далее с помощью 2 фильтраций для каждого изображения отдельно получаем низкие частоты (НЧ) (средняя яркость + фоновые засветки), средние частоты (СЧ) (детализировка) и высокие частоты (ВЧ) (мелкие элементы, шумы) изображений. В результате из этих 6 частей можно синтезировать 1 новое изображение. [3]

Из-за более высокого пространственного разрешения оптимально брать высокие частоты от ТВ изображения, низкие и средние частоты от ТПВ изображения. Этот тезис был подтверждён после обработки большого количества экспериментальных данных.



Рисунок 3 – Общий алгоритм работы декомпозиционных методов [3]

Алгоритм метода порогового сравнения [1][2]

1) Выбирается наиболее информативный канал по критерию наибольшего контраста, как правило — это ТВ канал.

2) Вычисляется средняя яркость ТПВ канала по формуле:

$$\bar{I}_{\text{ТПВ}} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I_{\text{ТПВ}}[i][j]}{MN},$$

где M и N – размеры изображения по ширине и высоте соответственно.

3) Вычисляется среднее значение абсолютных разностей между яркостями пикселей ТПВ-изображения и средним значением яркостей по формуле:

$$\bar{I}_{\Delta\text{ТПВ}} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |I_{\text{ТПВ}}[i][j] - \bar{I}_{\text{ТПВ}}|}{MN}.$$

4) Значение яркости комплексированного изображения вычисляется по формуле:

$$I_{\text{компл}}[i][j] = I_{\text{ТВ}}[i][j] + |I_{\text{ТПВ}}[i][j] - \bar{I}_{\text{ТПВ}}| - \bar{I}_{\Delta\text{ТПВ}},$$

где $I_{\text{ТВ}}[i][j]$ – яркость пикселя ТВ изображения с номером i по горизонтали, j по вертикали; $I_{\text{ТПВ}}[i][j]$ – яркость пикселя ТПВ изображения с номером i по горизонтали, j по вертикали.

Алгоритм метода линейной регрессии [1][2]

1) Выбирается наиболее информативный канал по критерию наибольшего контраста, как правило – это ТВ канал.

2) По методу наименьших квадратов определяются оценки линейной регрессии a и b величин яркости ТПВ-канала по значениям яркостей ТВ-канала. Параметры a и b вычисляются по формулам:

$$a = \frac{NM \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I_{\text{ТВ}}[i][j] I_{\text{ТПВ}}[i][j] - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I_{\text{ТВ}}[i][j] \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I_{\text{ТПВ}}[i][j]}{NM \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I_{\text{ТВ}}^2[i][j] - \left(\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I_{\text{ТВ}}[i][j] \right)^2},$$

$$b = \frac{1}{NM} \left(\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I_{\text{тпв}}[i][j] - a \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I_{\text{тв}}[i][j] \right).$$

3) Вычисляется промежуточное изображение по формуле:

$$I_{\text{пр}}[i][j] = a I_{\text{тв}}[i][j] + b.$$

4) Комплексированное изображение вычисляется по следующей формуле:

$$I_{\text{компл}}[i][j] = I_{\text{тв}}[i][j] + C(I_{\text{тпв}}[i][j] - I_{\text{пр}}[i][j]),$$

где C – поправочный коэффициент, примем $C = 1$.

Комплексирование с использованием вейвлет преобразования

В отличие от Фурье преобразований вейвлет-базисные функции являются хорошо локализованными, что дает возможность проводить локальный спектральный анализ. Спектральные вейвлет-коэффициенты соответствуют не только амплитудам различных частот, но и различным пространственным участкам на изображении. Для осуществления быстрого алгоритма вычисления вейвлет-преобразования в качестве базиса выбрана система вейвлетов Хаара. Данная система вейвлетов требует минимум вычислений, что немаловажно в условиях требований выполнения операций совмещения изображений в реальном масштабе времени [4], [5].

Простейшим видом вейвлет-базиса для изображений является разделимый базис, получаемый сжатием и растяжением одномерных вейвлетов. На каждом шаге преобразования выполняются два разбиения по частоте. Предположим, имеем изображение размером $N \times N$. Сначала каждая из N строк изображения делится на низкочастотную и высокочастотную половины. Далее, каждый столбец делится аналогичным образом. В результате получается четыре изображения размерами $N/2 \times N/2$: низкочастотное по горизонтали и вертикали, высокочастотное по горизонтали и вертикали, низкочастотное по горизонтали и высокочастотное по вертикали и высокочастотное по горизонтали и низкочастотное по вертикали, как показано на рисунке 4 [4], [6].

НЧНЧ сА	ВЧНЧ сН
НЧВЧ сV	ВЧВЧ сD

Рисунок 4 – Структура вейвлет-спектра изображения. Матрица C коэффициентов

Алгоритм метода вейвлет комплексирования [4]:

1) Синхронное дискретное прямое вейвлет-преобразование по вейвлету Хаара изображений обоих каналов и формирование матриц спектральных вейвлет-коэффициентов для исходных ТВ- и ТПВ-изображений.

Пусть $I \in \mathbb{R}^{M \times N}$ – исходное изображение (ТВ или ТПВ). Сначала проведём одномерное преобразование-Хаара по строкам:

$$a_r(i, j) = \frac{I(i, 2j) + I(i, 2j + 1)}{\sqrt{2}}, \quad d_r(i, j) = \frac{I(i, 2j) - I(i, 2j + 1)}{\sqrt{2}}.$$

Затем проводится одномерное преобразование Хаара по столбцам (к матрицам a_r, d_r):

$$\begin{aligned} LL(i, j) &= \frac{a_r(2i, j) + a_r(2i + 1, j)}{\sqrt{2}}, \\ HL(i, j) &= \frac{a_r(2i, j) - a_r(2i + 1, j)}{\sqrt{2}}, \\ LH(i, j) &= \frac{d_r(2i, j) + d_r(2i + 1, j)}{\sqrt{2}}, \\ HH(i, j) &= \frac{d_r(2i, j) - d_r(2i + 1, j)}{\sqrt{2}}. \end{aligned}$$

Для двух каналов получаем наборы коэффициентов:

$$\{LL_{TV}, HL_{TV}, LH_{TV}, HH_{TV}\}, \quad \{LL_{TPV}, HL_{TPV}, LH_{TPV}, HH_{TPV}\}.$$

2) Слияние (НЧНЧ – по весам; детали – по максимуму модуля).

Низкие частоты (НЧНЧ):

$$LL_F = \alpha LL_{TV} + (1 - \alpha) LL_{TPV}, \quad \alpha \in [0, 1] (\text{в работе } \alpha = 0.5).$$

Детальные поддиапазоны (НЧВЧ, ВЧНЧ, ВЧВЧ) – по коэффициентному выбору по модулю:

$$\begin{aligned}
HL_F(i, j) &= \begin{cases} HL_{TV}(i, j), & \text{если } |HL_{TV}(i, j)| \geq |HL_{TPV}(i, j)|, \\ HL_{TPV}(i, j), & \text{иначе,} \end{cases} \\
LH_F(i, j) &= \begin{cases} LH_{TV}(i, j), & \text{если } |LH_{TV}(i, j)| \geq |LH_{TPV}(i, j)|, \\ LH_{TPV}(i, j), & \text{иначе,} \end{cases} \\
HH_F(i, j) &= \begin{cases} HH_{TV}(i, j), & \text{если } |HH_{TV}(i, j)| \geq |HH_{TPV}(i, j)|, \\ HH_{TPV}(i, j), & \text{иначе.} \end{cases}
\end{aligned}$$

3) Обратное 2D-вейвлет-преобразование Хаара (восстановление комплексированного изображения).

Сначала обратное преобразование по столбцам (из LL_F, HL_F, LH_F, HH_F к a_r, d_r):

$$\begin{aligned}
a_r(2i, j) &= \frac{LL_F(i, j) + HL_F(i, j)}{\sqrt{2}}, & a_r(2i + 1, j) &= \frac{LL_F(i, j) - HL_F(i, j)}{\sqrt{2}}, \\
d_r(2i, j) &= \frac{LH_F(i, j) + HH_F(i, j)}{\sqrt{2}}, & d_r(2i + 1, j) &= \frac{LH_F(i, j) - HH_F(i, j)}{\sqrt{2}}.
\end{aligned}$$

Затем обратное преобразование по строкам (получаем итоговое изображение $I_{\text{компл}}$):

$$\begin{aligned}
I_{\text{компл}}(i, 2j) &= \frac{a_r(i, j) + d_r(i, j)}{\sqrt{2}}, \\
I_{\text{компл}}(i, 2j + 1) &= \frac{a_r(i, j) - d_r(i, j)}{\sqrt{2}}.
\end{aligned}$$

Оценка качества

Оценка качества комплексированных изображений проводилась двумя способами. Для количественной оценки качества использовался контраст. Качественную визуальную оценку проводила группа из более чем 10 операторов на большой выборке изображений с последующим опросом.

Оценим производительность приведённых выше алгоритмов. Оценка скорости работы производилась в Google Colab. Приведенные тесты выполнены с использованием Python 3.9 и OpenCV 4.5.1. Все тесты выполняются на Google Colab, который оснащен процессорами Intel Xeon с частотой 2,3 ГГц. [5]

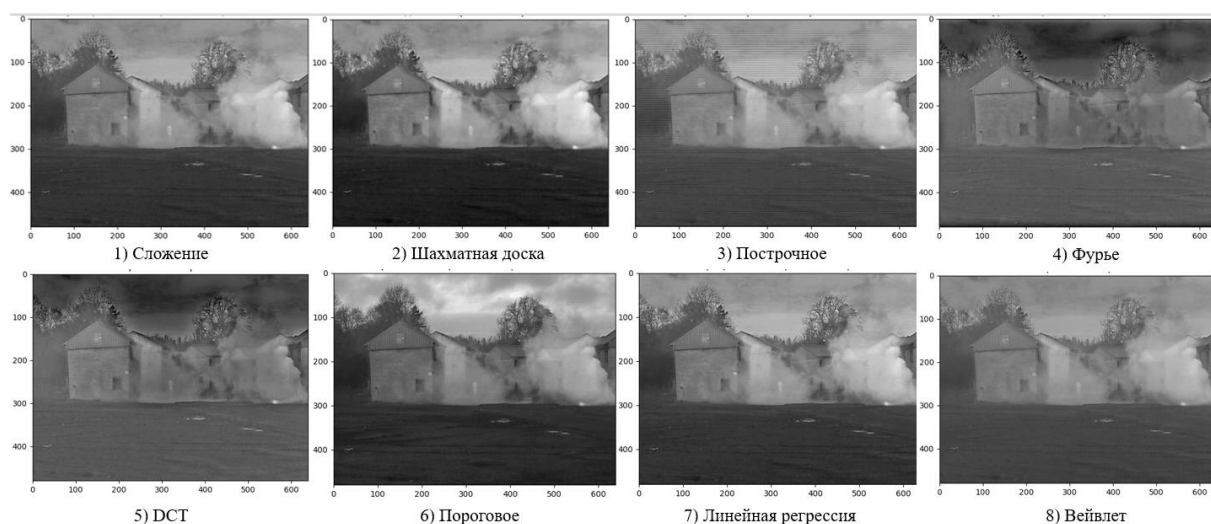


Рисунок 5 – Результаты работы алгоритмов методов комплексирования

Т а б л и ц а 1 – Оценка качества методов комплексирования

Алгоритм совмещения	Контраст	Оценка операторов (порядковое место по качеству)	Время выполнения, мс
1) Суперпозиция с нормировкой	0,216	8	0,1
2) Шахматная доска	0,215	6	12
3) Построчное комплексирование	0,235	7	15,2
4) Фурье комплексирование	0,207	3	4,7
5) DCT комплексирование	0,205	4	3,7
6) Пороговое комплексирование	0,549	1	0,2
7) Линейная регрессия	0,489	2	0,6
8) Вейвлет комплексирование	0,219	5	1,7

Результаты приведены для 1-й пары изображений, но похожие закономерности прослеживаются на большой выборке данных. Пороговое комплексирование и линейная регрессия дают наилучшие результаты на всей выборке, но при этом иногда

лучшее качество достигается с помощью порогового комплексирования, а иногда с помощью линейной регрессии.

Для повышения универсальности алгоритма для решения задачи комплексирования на большой выборке данных в данной работе предлагается в качестве итогового комплексированного изображения использовать линейную комбинацию данных двух методов: порогового комплексирования и линейной регрессии. Коэффициенты линейной комбинации подбирались экспериментально с помощью метода градиентного спуска при условии максимизации контраста на выборке. Были получены следующие результаты:

Коэффициент порогового сравнения: $K_{\pi} = 0,54$.

Коэффициент линейной регрессии: $K_p = 0,46$.

$$img_{\text{компл2}} = K_{\pi} \cdot img_{\pi} + K_p \cdot img_p,$$

где: $img_{\text{компл2}}$ – изображение, полученное как линейная комбинация двух компенсированных изображений; img_{π} – изображение, комплексированное методом порогового сравнения; img_p – изображение, комплексированное методом линейной регрессии.

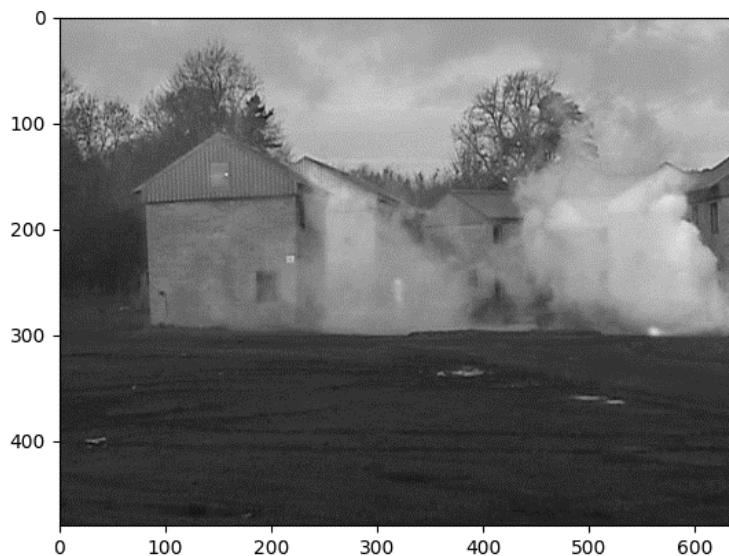


Рисунок 6 – Результат комплексирования методом линейной комбинации на первой паре изображений. Контраст 0,507. Время выполнения 1,1 мс

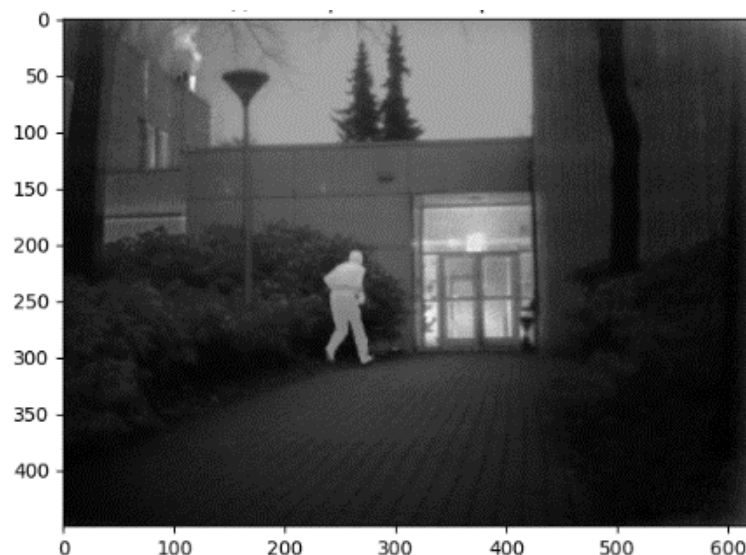


Рисунок 7 – Результат комплексирования методом линейной комбинации на 2 паре изображений. Контраст 0,552. Время выполнения 1 мс

Заключение

Предложенный метод линейной комбинации даёт универсально высокий контраст при сравнительно высокой производительности относительно других алгоритмов.

Качество геометрических методов (сложение, «шахматная доска», построчное комплексирование) меньше, чем декомпозиционных (FFT, DCT, вейвлет комплексирование). Алгоритмы с использованием линейной регрессии и порогового комплексирования оказались наиболее эффективными как с точки зрения качества, так и скорости выполнения.

Визуальное качество прямого сложения оказалось посредственным, но при этом быстродействие данного алгоритма наивысшее, так как для его реализации требуется наименьшее количество вычислительных операций.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по государственному заданию FSFN-2025-0015.

Литература

1. Ma, J. Infrared and visible image fusion methods and applications: A survey / J. Ma, Y. Ma, C. Li // *Information Fusion*. – 2019. – Vol. 45. – P. 153-178. – DOI 10.1016/j.inffus.2018.02.004. – EDN YHCONV.
2. Методы информационного совмещения изображений в многоканальных оптико-электронных системах / В. Н. Фролов, В. А. Тупиков, В. А. Павлова, В. А. Александров // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2016. – № 11-3. – С. 95-104. – EDN XEAIYP.
3. Infrared and Visible Image Fusion Technology and Application: A Review / W. Ma, K. Wang, J. Li [et al.] // *Sensors*. – 2023. – Vol. 23, No. 2. – P. 599. – DOI 10.3390/s23020599. – EDN FBJIAH.
4. Teterin, V. V. Method of combining information from a multichannel system, using wavelet spectra / V. V. Teterin, V. A. Pavlova, V. A. Aleksandrov // *Journal of Optical Technology*. – 2006. – Vol. 73, No. 10. – P. 698-701. – DOI 10.1364/JOT.73.000698. – EDN LKBOPD.
5. Козырев, В. Д. Алгоритмы предварительной обработки изображения для повышения характеристик распознавания объектов на основе нейронных сетей / В. Д. Козырев // *Студенческая научная весна : Сборник тезисов докладов Всероссийской студенческой конференции, посвященной 170-летию В.Г. Шухова, Москва, 01–30 апреля 2023 года*. – Москва: Издательский дом "Научная библиотека", 2023. – С. 493-495. – EDN WWEQNU.
6. Luo, Y.; Luo, Z. Infrared and Visible Image Fusion: Methods, Datasets, Applications, and Prospects. *Appl. Sci.* 2023, 13(19), 10891; <https://doi.org/10.3390/app131910891>.