

Галямов Руслан Ринатович, Магистрант,  
Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения

## ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

**Аннотация.** В статье представлен обзор существующих технических решений для оптических систем автономных обитаемых подводных аппаратов (АНПА). Рассмотрены физические факторы подводной среды, ограничивающие качество визуализации: поглощение и рассеяние света, мутность, солёность и глубина. Проведён анализ различных типов камер и систем освещения, выявлены их достоинства и недостатки. Сформулированы ключевые результаты анализа и определены перспективные направления развития оптических систем для подводной робототехники.

**Ключевые слова:** Подводная оптика, автономный обитаемый подводный аппарат, коэффициент ослабления, контрастность изображения, адаптивная система освещения, пространственное разнесение.

В последние десятилетия наблюдается стремительное развитие технологий автономных обитаемых подводных аппаратов, которые находят широкое применение в различных отраслях – от научных исследований до промышленных и оборонных задач. АНПА позволяют проводить мониторинг морских экосистем, инспектировать объекты на больших глубинах, осуществлять поиск и картографирование подводных объектов, а также выполнять миссии в труднодоступных или опасных для человека зонах. При этом особую роль в выполнении таких задач играет встроенная оптическая система, обеспечивающая визуализацию окружающей среды.

Однако особенности подводной среды накладывают серьёзные ограничения на эффективность работы оптики. В отличие от воздушной среды, вода значительно сильнее поглощает и рассеивает свет. Ключевые физические параметры, определяющие степень ослабления света, – коэффициент поглощения  $a(\lambda)$  и коэффициент рассеяния  $b(\lambda)$ , сумма которых даёт коэффициент ослабления  $c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda)$ . Для типичной прибрежной воды значение  $c$  составляет около  $0,5 \text{ м}^{-1}$ , что означает ослабление интенсивности света в 150 раз уже на дистанции 10 метров. В чистой океанической воде  $c$  снижается до  $0,05-0,15 \text{ м}^{-1}$ , а в мутной портовой может превышать  $0,8-1,0 \text{ м}^{-1}$ , сокращая эффективную дальность видимости до 3-5 метров. Также важными ограничивающими факторами являются мутность воды и солёность, влияющая на преломление света. Эти параметры не только ухудшают видимость, но и затрудняют обработку изображений.

Существующие оптические системы, используемые в автономных обитаемых подводных аппаратах, демонстрируют высокий уровень технологического развития, но их эффективность ограничена воздействием сложных условий подводной среды и техническими компромиссами. Основными факторами, снижающими эффективность съёмки, являются поглощение и рассеивание света, мутность и солёность воды. Эти явления ограничивают дальность обзора, ухудшают контрастность и цветопередачу, а также приводят к оптическим искажениям изображения [1].

Проблема заключается в отсутствии универсальных решений, позволяющих полностью компенсировать влияние данных факторов. Это создаёт сложности при выполнении исследовательских, мониторинговых и поисковых задач. В связи с этим актуальной задачей



является анализ физических зависимостей между параметрами водной среды и характеристиками визуализации с целью выявления технических ограничений и разработки рекомендаций по выбору или адаптации оптических систем для различных условий эксплуатации.

Одной из ключевых задач при проектировании оптических систем для автономных необитаемых подводных аппаратов является обеспечение стабильного качества изображения в условиях ограниченной видимости. Несмотря на значительный прогресс в области подводной оптики, современные камеры сталкиваются с рядом серьёзных ограничений, связанных с особенностями подводной среды. Ключевые трудности определяются физико-химическими свойствами воды: наличием взвешенных частиц, переменной солёностью и рассеиванием света.

Основу работы оптической системы АНПА составляет фокусировка отражённого от объектов света через объектив на светочувствительный сенсор, где изображение преобразуется в электрический сигнал. На эффективность этой системы влияют параметры объектива, характеристики сенсора, алгоритмы обработки изображения и тип используемого освещения [2]. Причём освещение играет критическую роль: уже на глубине около 10 метров красная часть спектра почти полностью исчезает, что приводит к характерным цветовым искажениям. В мутной воде это усугубляется дополнительным рассеиванием, что снижает резкость и сокращает эффективную дальность наблюдения.

В условиях недостатка естественного света, особенно при работе на глубине или в затенённых зонах, подавляющее большинство подводных визуальных систем применяют искусственные источники освещения. Это делает актуальным не только выбор камеры, но и комплексную оптимизацию всей оптической системы: оптики, подсветки, цифровой обработки сигнала и конфигурации размещения компонентов.

Кроме хороших технических характеристик, современная подводная система визуализации должна обладать высокой адаптивностью – например, возможностью автоматически подстраиваться под изменения освещённости при погружении на различные глубины. В противном случае камеры теряют информативность. Именно поэтому задачей данного исследования является систематизация и анализ существующих технических решений в области подводной визуализации, оценка их устойчивости к внешним факторам и поиск путей повышения качества изображения в сложных условиях.

Для обеспечения визуального мониторинга в составе автономных необитаемых подводных аппаратов применяются различные типы оптических камер, отличающиеся по конструкции, функциональности и области применения. Однако выбор той или иной камеры во многом определяется условиями работы – глубиной погружения, мутностью воды, уровнем освещённости и необходимой степенью детализации изображения. Ниже приведён обзор нескольких распространённых решений с кратким анализом их достоинств и недостатков.

Камеры серии ВП – ВП-1, ВП-3 и ВП-4 (рис. 1) выделяются простотой конструкции, компактностью и широким углом обзора до  $104^\circ$ , что делает их удобными для ориентации и общего визуального сопровождения миссий. CMOS сенсоры обеспечивают хорошую светочувствительность, а рабочая глубина до 3000 м расширяет диапазон применения. Однако ограниченное разрешение, не выше Full HD, приводит к недостаточной детализации, особенно в условиях высокой мутности, где мелкие объекты теряются на фоне шумов [3].





Рисунок 1. Подводная камера ВП-4

Камера КТ-441, представленная на рисунке 2, относится к более высокому классу по уровню детализации: разрешение  $2048 \times 1536$  пикселей позволяет получать чёткие изображения даже при слабом освещении. Этому способствует высокая светочувствительность, а также относительно короткое фокусное расстояние. Однако её узкий угол обзора ( $52^\circ$ ) ограничивает область наблюдения, что делает камеру менее подходящей для задач общего осмотра или ориентирования в ограниченном пространстве [4].



Рисунок 2. Глубоководная камера КТ-441.

Наиболее перспективной для использования в современных АНПА является адаптивная система фото- и видеорегистрации (АСПВ) разработки АО «НПО «Аврора». Данная система создавалась специально для малогабаритных автономных аппаратов и представляет собой интегрированное решение, объединяющее высокочувствительную камеру, импульсную светодиодную подсветку и алгоритмы обработки изображения. В её основе – монохромная матрица Sony IMX265LLR с разрешением  $2048 \times 1536$  пикселей и светочувствительностью 0,1 лк, что позволяет вести съёмку в условиях крайне слабого естественного света. Ключевыми особенностями АСПВ являются:

- импульсный режим светодиодной подсветки, снижающий среднее энергопотребление и уменьшающий засветку мутной воды;
- пространственное разнесение осветителя и камеры, реализованное путём смещения источника света относительно оптической оси объектива (рис. 3), что позволяет минимизировать влияние обратного рассеяния;
- аппаратно-реализованная обработка сигнала, обеспечивающая коррекцию цветовых искажений и повышение контрастности в реальном времени.



Однако данная система рассчитана на глубину до 1000 м, что сужает сферу её применения в глубоководных миссиях. Тем не менее, для большинства прибрежных и шельфовых работ этот диапазон является достаточным, а достигнутое качество визуализации существенно превосходит традиционные решения.

Помимо этого, в данной системе реализовано пространственное разнесение оптических элементов, представленное на рисунке 3, в частности – смещение источника света относительно оптической оси объектива. В данной конструкции источник света и телевизионная камера расположены под определёнными углами, с расчётным смещением, обеспечивающим минимизацию засветки в зоне съёмки. Геометрические параметры разнесения подбирались с учётом габаритов АНПА, компоновки оборудования и предполагаемой дистанции наблюдения. Что позволило существенно уменьшить влияние обратного рассеивания, сократив засвеченную зону воды перед объективом и повысив общее качество визуализации [5].

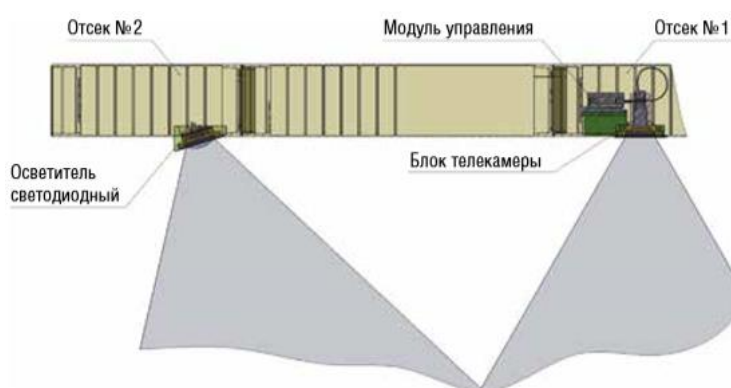


Рисунок 3. Пространственное разнесение осветителя и камеры в АНПА

Для наглядного сравнения характеристик камер, была составлена таблица 1.

Таблица 1

Параметры используемых камер

Наименование параметра	ВП-1	ВП-3	ВП-4	АСПВ	КТ-441
Разрешение, пкс	1920×1080 (2,4 Мпкс)	1920×1080 (2,4 Мпкс)	1920×1080 (2,4 Мпкс)	2048×1536 (3,15 Мпкс)	2048x1536
Оптический формат	1/2.8"	1/2.8"	1/1.8"	1/1.8"	1/2,5"
Тип сенсора	CMOS	CMOS	CMOS	CMOS	CMOS
Светочувствительность, лк	1	0,02	1	0,1	0,05
Диаметр, мм	80	108	88	29	106
Длина, мм	117	175	214	60	194
Вес, кг	1.05	2,9	1,57	3,9 кг	3,9
Формат видео	H.264	H.264	H.264	H.264 и MJPEG	H.264
Рабочая глубина, м	3000	3000	3000	1000	6000



Фокусное расстояние, мм	3	3	3.5	6	5
Диафрагма объектива	f/1,8	f/1,8	f/1,6	f/1,4	f/1,6
Напряжение питания	24 В	24 В	15 ... 30 В	12 В	12 В
Угол обзора	104°	104°	104°	52°	60°

Анализ существующих оптических решений, используемых в составе автономных необитаемых подводных аппаратов, позволил выделить ряд системных ограничений, существенно влияющих на качество изображения в реальных условиях эксплуатации. При высокой мутности и переменной солёности воды ухудшается фокусировка и снижается контрастность, что делает невозможным стабильное распознавание объектов на дальнем расстоянии. Изучение типовых конфигураций камер показало, что решения, ориентированные на широкий угол обзора, страдают от недостаточной детализации, тогда как модели с высокой разрешающей способностью часто имеют ограниченное поле зрения и слабо адаптированы к быстро меняющимся условиям освещения. Также выявлено, что не все системы обладают достаточной гибкостью для работы в условиях переменной глубины или в зонах с низким уровнем освещённости, где требуется динамическая адаптация параметров съёмки.

По итогам проведённого анализа можно сформулировать следующие результаты:

1. Выявлены ключевые факторы, ограничивающие работу оптических систем в подводной среде: поглощение и рассеяние света, мутность, солёность, глубина. Установлены количественные значения коэффициента ослабления для различных типов вод (0,05-0,15 м<sup>-1</sup> – чистая океаническая; 0,2-0,6 м<sup>-1</sup> – прибрежная; 0,8-2,0 м<sup>-1</sup> – мутная портовая).

2. Определены преимущества и недостатки различных типов камер (монохромные, цветные, с высокой чувствительностью, мультиспектральные) и систем подсветки (светодиодные, лазерные, инфракрасные). Показано, что универсального решения не существует, выбор зависит от условий эксплуатации.

3. Установлено, что пространственное разнесение осветителя и камеры (реализованное в системе АСПВ) позволяет существенно снизить влияние обратного рассеяния, повышая контрастность и дальность видимости.

4. Проведён сравнительный анализ технических решений, который показал, что наиболее перспективными для работы в условиях переменной мутности и глубины являются адаптивные системы с импульсной подсветкой, пространственным разнесением элементов и алгоритмической коррекцией изображений в реальном времени.

5. Обоснована необходимость комбинированного подхода к управлению АНПА, сочетающего телеметрическое управление для сложных операций и автономную навигацию для рутинных задач, что предъявляет повышенные требования к надёжности и качеству видеопотока.

В рамках магистерской диссертации планируется на основе полученных результатов разработать рекомендации по выбору и адаптации оптической системы АНПА для конкретных условий эксплуатации, провести моделирование влияния параметров среды на качество изображения и предложить технические решения, повышающие устойчивость визуализации в широком диапазоне условий.

*Список литературы:*

1. Н.А. Будко, А.Ю. Будко, М.Ю. Медведев., Вычитание помехи обратного распространения на основе поляризации в системах подводного видения для работы в мутной воде. // Технические науки. 2022.



2. Войтов А.А., Сергеев В.В., Соколов В.А., Форсов Б.Ю. «Формирование изображений в активных системах подводного видения». Вопросы радиоэлектроники, сер. // Техника телевидения, 2015, вып.5. С. 21-31.

3. Подводные Full HD камеры [Электронный ресурс] – URL: <http://marinegeoservice.ru/ROV-Parts-Cameras.html?ysclid=m84ne1e7ex494518771>

4. Чванов В. Александров А. Глубоководные ТВ-камеры СКБ «Энергия» [Электронный ресурс] – URL: <https://oborona.ru/product/chvanov-vladimir/glubokovodnye-tv-kamery-skb-ehnergiya-42290.shtml?ysclid=m84nxaah23877007803>

5. Сергеев В.В., Карпов В.В., Прибылов Ю.С., Пшеничная О.К., Соколов В.А. Современные технологии подводного видения. Адаптивная система фото и видео регистрации для автономных необитаемых подводных аппаратов [Электронный ресурс] – URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/oborudovanie/625114-sovremennye-tekhnologii-podvodnogo-videniya-adaptivnaya-sistema-foto-i-video-registratsii-dlya-avton/>.

