УДК 551.46.0

DOI: 10.37102/1992-4429\_2024\_49\_03\_06 EDN: UKYORG

# ЛАЗЕРНАЯ ОПТИКО-ТЕЛЕВИЗИОННАЯ АКТИВНО-ИМПУЛЬСНАЯ СИСТЕМА ПОДВОДНОГО ВИДЕНИЯ

#### Ю.К. Грузевич, П.С. Альков, Л.М. Балясный, О.В. Чистов

Статья посвящена рассмотрению возможности применения активно-импульсного метода наблюдения для обеспечения подводного видения в условиях рассеивающей морской воды. Предложена для реализации этого метода лазерная оптико-телевизионная активно-импульсная система подводного видения (АИС ПВ), основанная на синхронизированной импульсной лазерной подсветке подводных объектов и регистрации видеоизображения специально разработанной оптико-телевизионной камерой на основе высокоэффективного фотоприемного модуля с чувствительной структурой «Электронно-оптический преобразователь III+ поколения с продленной в сине-зеленую область спектра характеристикой фоточувствительности – цифровая КМОП-матрица», обеспечивающего формирование в морской воде видеоизображений подводных объектов с определением дальности до них. Приведены сведения о физических предпосылках технической реализации подводного видения в рассеивающей морской воде, а также сведения о технических решениях создания ключевых элементов АИС ПВ, которые способны повысить дальность видения за счет отсечки помехи обратного рассеяния при наблюдении в морской воде. Это преимущество отличает АИС ПВ от пассивных оптико-телевизионных систем, в которых обратное рассеяние накладывается на получаемое изображение объекта, существенно снижая дальность видения и качество получаемого изображения. Результаты выполненной работы направлены на повышение контрастности изображения наблюдаемого подводного объекта и, следовательно, дальности видения АИС ПВ. Приведено описание разработанного макетного образца АИС ПВ.

**Ключевые слова:** активно-импульсная система, электронно-оптический преобразователь, фотоприемный модуль, импульсный лазер, помеха обратного рассеяния.

#### Введение

Одним из перспективных направлений развития оптико-электронных систем для контроля подводной обстановки и проведения подводных поисково-спасательных работ является создание лазерных активно-импульсных оптико-телевизионных систем подводного видения (далее по тексту – АИС ПВ), которые обеспечивают формирование видеоизображения подводных объектов в рассеивающей морской воде на основе применения активно-импульсного метода наблюдения, предложенного еще академиком А.А. Лебедевым в 1936 г. [1]. Для практического использования данного метода для обнаружения и распознавания в реальном времени малогабаритных подводных объектов в условиях сильно рассеивающей морской воды регистрирующий канал АИС ПВ, разработанный ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ»,

создан на основе быстродействующего фотоприемного модуля (далее по тексту – ФПМ) собственной разработки, высокочувствительного в спектральном диапазоне прозрачности морской воды, а подсвечивающий канал – на основе высокоэффективного импульсного твердотельного Nd:YAG лазера с диодной накачкой, излучающего в спектральном диапазоне прозрачности морской воды.

Ключевым элементом, обеспечивающим обнаружение и распознавание малогабаритных, низкоконтрастных подводных объектов в отсутствии подсвечивающего солнечного излучения, на больших глубинах, на фоне морского дна и в условиях сильно рассеивающей водной среды, является специально разработанный специалистами ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ» для подводного видения современный электронно-оптический преобразователь (далее по тексту – ЭОП) Ш<sup>+</sup> поколения с продленной в сине-зеленую область спектра характеристикой с GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As фотокатодом с отрицательным электронным сродством, фоточувствительным в спектральном диапазоне от 0.45 до 0.87 мкм, который обеспечивает с высоким быстродействием (несколько десятков наносекунд) высокий коэффициент преобразования яркости изображений (в десятки тысяч раз). На основе ЭОП III<sup>+</sup> поколения, высокочувствительного в спектральном диапазоне прозрачности морской воды, для создания АИС ПВ специалистами ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ» был разработан высокоэффективный фотоприемный модуль типа ФПМ-5-1-Ф, в котором для получения видеоизображения ЭОП III<sup>+</sup> поколения состыкован волоконно-оптическим фоконом с цифровой КМОП- матрицей высокого разрешения [2].

Приведенный в статье материал показывает, что включение лазерных активно-импульсных оптико-телевизионных систем в состав подводной робототехники, подводных телеуправляемых аппаратов, обитаемых и необитаемых подводных комплексов позволит обеспечить их эффективное применение за счет получения в реальном времени видеоизображений осматриваемого подводного пространства, которые будут использоваться для принятия оперативных решений.

Кроме того, разрабатываемые АИС ПВ позволят обеспечить мониторинг подводной инфраструктуры, который целесообразно связать с задачами:

 получения в морских обитаемых и необитаемых робототехнических комплексах информации о наличии в угловом поле АИС ПВ различных подводных объектов;

 выявления минной опасности и морских диверсантов;

– борьбы с морским терроризмом;

 мониторинга трубопроводов, подводных кабелей и скважин;

 проведения монтажных работ в мутной морской воде;

- проведения поисково-спасательных работ;

 мониторинга поверхностей подводных объектов и других применений.

# 1. Метод активно-импульсного подводного видения и аппаратура

Одним из способов быстрого и эффективного наращивания возможностей подводных обитаемых и необитаемых комплексов, а также подводных телеуправляемых аппаратов является их оснащение высокоэффективными оптико-телевизионными системами видеонаблюдения, которые можно подразделить на две большие группы: пассивные и активно-импульсные.

В пассивных системах подводного видения изображение формируется при:

 – естественном (солнечном) освещении, хотя, как правило, на большой глубине отсутствует подсвечивающее солнечное излучение;

 использовании мощных прожекторных осветителей для постоянной подсветки подводных объектов.

Известно, что в воде световой поток ослабляется значительно сильнее, чем в атмосфере. Можно компенсировать ослабление подсвечивающего оптического излучения повышением мощности светового потока. Однако это приводит к увеличению яркости помехи обратного рассеяния (далее по тексту – ПОР), снижающей контрастность изображения. Опыт эксплуатации подводных пассивных оптико-телевизионных систем подводного видения показывает, что для увеличения предельной дальности на (15—20%) необходимо увеличить мощность источника света прожектора в 10 раз [3]. Анализ результатов работы отечественных подводных пассивных оптико-телевизионных систем, выполненный специалистами ФГУП СПМБМ «Малахит», позволяет сделать вывод, что возможности прожекторных осветителей для увеличения дальности подводного видения практически исчерпаны. При этом их самым большим достоинством является относительная дешевизна [3].

Активно-импульсные оптико-телевизионные системы используют для работы искусственную подсветку, создаваемую специальными импульсными лазерными источниками, синхронно работающими с фотоприемными оптико-телевизионными каналами, также работающими в импульсном режиме.

Важнейшими ключевыми элементами, используемыми для создания высокоэффективных *лазерных АИС ПВ*, являются:

– быстродействующий, специально разработанный специалистами ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ», ЭОП III+ поколения с высокой квантовой эффективностью в спектральной области прозрачности морской воды (от 450 до 550 нм). Спектральные характеристики ЭОП III+ поколения и морской воды приведены на рис. 1 [2]. Из рис. 1 видно, что стандартный ЭОП III+ поколения имеет низкую чувствительность в спектральном диапазоне прозрачности морской воды, что и заставило разработать специальный ЭОП, который получил название: ЭОП III+ поколения с «голубым» фотокатодом;

программируемая стробируемая цифровая ТВ камера на основе КМОП-матрицы, оптически сопря-



*Рис. 1.* Спектральные характеристики прозрачности морской воды и ЭОП III+ поколения

женная с ЭОП III+ поколения с «голубым» фотокатодом;

– высокоэффективный импульсный лазер, рабочим телом которого является кристалл Nd:YAG, накачка рабочего тела которого осуществляется диодными линейками, а модуляция добротности производится электрооптическим затвором. Удвоение частоты генерации (на длине волны 527 нм) осуществляется элементом на основе кристалла КТР, что обеспечивает излучение в спектральной области прозрачности морской воды (рис. 1). При энергии в импульсе в несколько десятков мДж длительность импульса (по уровню 0,5) составляет порядка 10–15 нс;

– быстродействующий цифровой контроллер для управления импульсным питанием ЭОП III+ поколения, КМОП- матрицей и импульсным лазером, а также для первичной обработки цифровых изображений обнаруженных подводных объектов. Регулируемый временной строб управления включает приемный канал АИС ПВ на определенной дальности, устраняет помеху обратного рассеяния и обеспечивает наблюдение по глубине подводного пространства в отсутствии солнечного излучения.

Принцип действия АИС ПВ основан на активно-импульсном методе наблюдения. Метод заключался в освещенности наблюдаемого пространства импульсами оптического излучения с длительностью меньшей, чем время распространения импульсов до объектов наблюдения, и в синхронизированном приеме отраженных от данных объектов наблюдения оптических сигналов. Такой метод наблюдения обеспечивает формирование изображений в ограниченном по глубине окружающем подводном пространстве и резко уменьшает зависимость наблюдения от условий освещенности объектов наблюдения и от окружающих их фонов (толщи воды или донной поверхности), а также естественных оптических помех – это сама рассеивающая морская вода и *водоросли*, а также находящиеся в ней растворённые и взвешенные вещества органического (целые и разрушенные скелеты планктона и другие морские организмы) и неорганического происхождения (глинистые минералы, песок, зерна и обломки кварца и другие минералы, находящиеся во взвешенном состоянии).

Применение активно-импульсного метода формирования подводных видеоизображений позволяет устранить «паразитное» влияние помехи обратного рассеяния оптического излучения, обусловленное оптическими помехами, которые накладываются на полезное изображение наблюдаемых подводных объектов, снижая их контраст.

Реализация технологии активно-импульсного режима привела к созданию приборов, обеспечивающих подводное видение на экране телевизионного монитора за счет комбинированных оптико-телевизионных, лазерных и оптических технических решений. Практическое значение активно-импульсного режима заключается в достижении высокой дальности подводного видения по сравнению с другими пассивными оптическими и оптико-электронными приборами, а также высокочастотными гидролокаторами секторного обзора, работающими в идентичных условиях. Переход на качественно новый уровень получения визуальной видеоинформации расширил ограниченные естественным образом возможности человеческого глаза.

Для получения многократно усиленного изображения и формирования соответствующего видеосигнала разработан ФПМ на основе ЭОП Ш+ поколения с «голубым» фотокатодом, который состыковывается с крупноформатной цифровой КМОП-матрицей с помощью волоконно-оптического фокона. На рис. 2



Рис. 2. Структура фотоприемного модуля типа ФПМ-5-1 на основе ЭОП III+ поколения с «голубым фотокатодом» и цифровой КМОП-матрицы

показана структура фотоприемного модуля типа ФПМ-5-1-Ф, на рис. 3 приведен его внешний вид, а на рис. 4 – конструкция [2].



Рис. 3. Внешний вид фотоприемных модулей типа «ФПМ-5-1»

Лазерное импульсное подсвечивающее излучение, отраженное от подводных объектов, попадает на входной объектив приемного канала АИС ПВ и фокусируется на ЭОП III+ поколения с «голубым фотокатодом». Далее происходит многократное преобразование (в десятки тысяч раз) светового изображения и формирование усиленного изображения на экране ЭОП. После этого изображение волоконнооптическим фоконом переносится на матричную фоточувствительную поверхность цифровой мегапиксельной КМОП-матрицы, которая обеспечивает преобразование оптического (светового) сигнала в видеосигнал на выходе АИС ПВ.

Использование волоконнооптического фокона переноса приводит к потерям пространственного разрешения И энергетических xaрактеристик переносимого оптического изображения. Наибоперспективным лее развитием приемной системы является использование конструкций, в которых цифровая КМОП-матрица внутри помещается вакуумного объема ЭОП и возбуждается



Рис. 5. Структура перспективного гибридного ФПМ для АИС ПВ

непосредственно электронным пучком, содержащим информацию об изображении подводных объектов. На рис. 5 приведена структура перспективного гибридного ФПМ для АИС ПВ. При этом значительно снижаются пространственно-частотные потери, так как отсутствует фокон для переноса изображения, а усиление электронного потока осуществляется за счет бомбардировки электронами обратной стороны специально уменьшенной по толщине фоточувствительной структуры цифровой КМОП-матрицы. Шумовые характеристики такого гибридного прибора значительно лучше, чем традиционного ФПМ. В настоящее время как в нашей стране, так и за рубежом ведется разработка перспективных гибридных ФПМ, также фоточувствительных в спектральном диапазоне прозрачности морской воды.

Подводное видение, осуществляемое лазерными активно-импульсными оптико-телевизионными си-



Рис. 4. Конструкция фотоприемного модуля типа ФПМ-5-1

стемами, позволяет оператору вести наблюдение под водой в полной темноте (в отсутствии солнечного излучения). При этом обеспечивается качественное наблюдение удаленных подводных объектов в рассеивающих морских средах, когда при использовании стандартных телевизионных камер, работающих совместно с даже мощными прожекторами, практически невозможно обнаружить и распознать подводные объекты из-за наличия помехи обратного рассеяния.

Сильно рассеивающая водная среда создает обратное рассеяние излучения подсвета, которое накладывается на полезное изображение цели. Его контраст резко снижается, что зачастую приводит к полной потере видимости, в особенности при пониженной прозрачности морской воды [3, 4]. Совершенно очевидно, что не все объекты представляют интерес для наблюдения, а некоторые – являются помехой и препятствием для наблюдения. Визуальную информацию о таких объектах необходимо исключить из процесса формирования изображения. С этой целью приемник оптического излучения выключается на период времени, когда возвращается световой импульс, отраженный от всех нежелательных для наблюдения помеховых объектов, а на фотоприемный канал АИС ПВ поступает визуальная информация только от истинных подводных объектов наблюдения. При этом все мешающие наблюдению факторы, в том числе помеха обратного рассеяния, яркие огни прожекторов и другие факторы, исключаются.

Для обеспечения эффективной работы активно-импульсной системы в морской воде ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ» специально разработало и изготавливает ЭОП III<sup>+</sup> поколения с фотокатодами с отрицательным электронным сродством со спектральной характеристикой, продленной в сине-зеленую область спектра прозрачности морской воды (рис. 1), которые обладают рядом преимуществ по сравнению с ЭОП II, II<sup>+</sup>, SuperII<sup>+</sup>, HyperII<sup>+</sup> поколений [2].

Во-первых, они имеют значительно (в 1,5–2 раза) более высокую чувствительность в спектральном диапазоне прозрачности морской воды.

Во-вторых, удельное сопротивление фотокатодов ЭОП III<sup>+</sup> поколения очень низкое, что позволяет осуществлять стробирование короткими импульсами (до единиц наносекунд), что возможно при использовании ЭОП предыдущих поколений (ЭОП II, II<sup>+</sup>, SuperII<sup>+</sup>, HyperII<sup>+</sup> поколений), только для этого необходимо использовать проводящую сетку, которую напыляют на стеклянную подложку фотокатода, что существенно усложняет технологию изготовления ЭОП.

Этим объясняется почему до настоящего времени на рынке практически отсутствуют активно-импуль-

сные оптико-телевизионные системы подводного видения, удовлетворяющие по всей совокупности современных требований.

## 2. Методика определения энергетических характеристик АИС ПВ

Рассмотрим вариант активно-импульсной системы подводного видения (рис. 6), когда импульсный лазерный источник освещает подводный объект на фоне донной поверхности, а отраженное подводным объектом лазерное излучение регистрируется фотоприемным модулем (ФПМ) на основе чувствительной структуры ЭОП III+ поколения с «голубым» фотокатодом – многоэлементная цифровая КМОП-матрица.



Рис. 6. Схема формирования изображения активно-импульсной системой подводного видения

Пусть лазерный подсвечивающий источник с диаграммой направленности 2а, и многоэлементный приемник оптического излучения из состава ФПМ с «элементарной» диаграммой направленности 2а, расположены рядом на расстоянии b, а расстояние zдо плоскости объекта наблюдения значительно больше базы b, поэтому при расчете мощности сигнала, образующего изображение, можно положить b = 0. Положим также, что объект наблюдается на протяженном фоне, находящемся в непосредственной близости от него (например, подводный объект на морском дне). Объект расположен в центре углового поля приемной оптической системы; объект и фон будем для простоты считать плоскими, диффузно отражающими. Средний по объекту коэффициент отражения обозначим  $\rho_{ob}$ , а средний по фону –  $\rho_{\phi}$ .

В общем случае сигнал, формирующий элемент изображения, слагается из следующих составляющих: Р = Р<sub>об</sub> + Р<sub>пор</sub> – при ориентации «элементарной» приемной диаграммы на объект;

 $P = P_{\phi} + P_{nop} - при ориентации «элементарной» приемной диаграммы на фон,$ 

где  $P_{o\delta}$  – мощность сигнала, который формируется в элементе изображения лазерным излучением, отраженным от объекта;  $P_{\phi}$  – мощность сигнала, отраженного от фона;  $P_{nop}$  – мощность помехи обратного рассеяния (ПОР), вызванной обратным отражением зондирующего лазерного импульса от толщи морской воды.

На рис. 7 схематически показан профиль оптического эхо-сигнала *P*, поступающего на ФПМ при импульсном освещении. На фоне плавно изменяющейся помехи обратного рассеяния (далее по тексту – ПОР) имеется «всплеск», соответствующий сигналу, пришедшему от объекта. При этом максимум ПОР от импульсного источника регистрируется ФПМ раньше, чем сигнал, отраженный от объекта.



Рис. 7. Профиль эхо-сигнала при импульсном освещении объекта в морской воде

Применение импульсных лазерных источников в системах видения позволяет осуществить отсечку большей части ПОР путем введения стробирования по дальности. При этом эффективная отсечка ПОР происходит при пространственном положении строба в области обнаруживаемого объекта, когда длительность строба  $\Delta t_{cmp}$  равна длительности зондирующего лазерного импульса  $t_{um}$ , т.е.  $\Delta t_{cmp} = t_{um}$ . В этом случае ФПМ принимает сигнал от объекта и помеху обратного рассеяния с глубины пространства:

$$\Delta l = v t_{uv}/2,$$

где *v* – скорость света в морской воде.

Мощность полезного сигнала в изображении, сформированном АИС ПВ, от объекта *P*<sub>об</sub> при ориентации АИС ПВ на середину объекта согласно описывается выражением [4]:

$$\boldsymbol{P}_{oo} = \frac{\boldsymbol{P}_{0} \sum_{n} \boldsymbol{\Omega}_{n}}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \boldsymbol{\rho}(\overline{\boldsymbol{r}_{s}}) \boldsymbol{E}_{u}(\overline{\boldsymbol{r}_{s}}) \boldsymbol{E}_{n}(\overline{\boldsymbol{r}_{s}}) d \overline{\boldsymbol{r}_{s}}$$
(1)

где  $P_0$  – мощность источника лазерной подсветки;  $\Sigma_n = \pi r_n^2$ ;  $\Omega_n = \pi \alpha_n^2 \ \tilde{n}(\overline{r_s})$  – распределение коэффициента отражения на объекте.

Объект наблюдения считается плоским, ограниченным, диффузно отражающим. При этом обозначим:  $E_u$  и  $E_n$  – освещенности в плоскости объекта от действительного и «фиктивного» (с параметрами ФПМ) источников оптического излучения.

Мощность сигнала в изображении от фона P<sub>ф</sub>, представляющего собой плоскую диффузно отражающую бесконечно протяженную донную поверхность, описывается выражением [4]:

$$\boldsymbol{P}_{\phi} = \frac{\boldsymbol{P}_{0} \sum_{n} \boldsymbol{\Omega}_{n} \boldsymbol{\rho}_{\phi}}{\boldsymbol{\pi}} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \boldsymbol{E}_{u} \left( \overline{\boldsymbol{r}_{s}} \right) \boldsymbol{E}_{n} \left( \overline{\boldsymbol{r}_{s}} \right) \boldsymbol{d} \, \overline{\boldsymbol{r}_{s}}.$$
(2)

Мощность помехи обратного рассеяния  $P_{nop}$  при условии, когда лазерный источник и ФПУ расположены на расстоянии *b*, а оси их параллельны, описывается выражением [4]:

$$\boldsymbol{P}_{nop} = \frac{\boldsymbol{P}_0 \sum_n \boldsymbol{\Omega}_n}{\boldsymbol{\pi}} \left( \frac{\boldsymbol{\sigma} \boldsymbol{X}_n \boldsymbol{v} \boldsymbol{t}_{\text{HM}}}{8} \right) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \boldsymbol{E}_u \left( \overline{\boldsymbol{r}_s} \right) \boldsymbol{E}_n \left( \overline{\boldsymbol{r}_s} - \overline{\boldsymbol{b}} \right) d\overline{\boldsymbol{r}_s} . (3)$$

В выражении (3)  $\rho = \left(\frac{\sigma x_n v t_{_{\rm HM}}}{8}\right)$  имеет смысл коэффициента отражения слоя морской волны толщиной  $\frac{v t_{_{\rm HM}}}{2}$  в обратном направлении, а  $x_n$  – значение индикатрисы рассеяния  $x(\gamma)$  в обратном направлении ( $\gamma = \pi$ ).

Для нахождения мощности сигнала в изображении от пространственно-ограниченного объекта  $P_{o6}$  воспользуемся формулой (1) и будем считать объект плоским, диффузно рассеивающим, с гауссовым распределением коэффициента отражения:  $\rho(r_{\perp}) = \rho_{o6} \exp(r_{\perp}^2 / r_0^2)$ , где  $r_0 - эффективный размер объекта:$ 

$$\frac{P_{o\delta}}{P_0} = \frac{K_{onm} \rho_{o\delta} r_n^2 \alpha_n^2 \exp\left[-2\varepsilon z \left(1-\Lambda\right)\right]}{4\mu^2 \Lambda \varepsilon z^3 + \left(\alpha_u^2 + \alpha_n^2\right) z^2} q_2 \qquad (4)$$
$$q_2 = \frac{1}{1 + \frac{r_{ou}^2 r_{on}^2}{\left(r_{ou}^2 + r_{on}^2\right) r_0^2}} = 1$$

Функция  $q_2$  учитывает зависимость  $P_{ob}$  от размера объекта  $r_0$ ; z – расстояние до объекта;  $K_{onn}$  – коэффициент пропускания оптической системы АИС ПВ;  $2r_n$  – диаметр входного зрачка объектива приемного устройства;  $\rho_{ob}$  – коэффициент отражения объекта;

 $\varepsilon$  – показатель ослабления морской воды;  $\Lambda$  – вероятность выживания фотона;  $\mu$  – параметр индикатрисы рассеяния.

При размерах объекта:  $r_s=1$  м,  $\alpha_{\rm H}=0,0015$  рад и z=10 м получим:  $r_{_{3\rm H}}^2 = 2\Lambda\mu^2\varepsilon z^3 + z^2\alpha_{_{\rm H}}^2 = 2,9716\cdot10^{-4};$  $r_{_{3\rm H}}^2 = 2\Lambda\mu^2 z^3 + z^2\alpha_{_{\rm H}}^2 = 2,4092\cdot10^{-4};$   $P_{_{\rm of}} = 3,25\cdot10^{-7}$  Вт.

Для определения мощности сигнала в изображении от фона Р<sub>ф</sub> воспользуемся формулой (2):

$$\frac{P_{\phi}}{P_0} = \frac{K_{onm} \rho_{\phi} r_n^2 \alpha_n^2 \exp\left[-2\varepsilon z \left(1-\Lambda\right)\right]}{4\mu^2 \Lambda \varepsilon z^3 + \left(\alpha_u^2 + \alpha_n^2\right) z^2},$$
 (5)

где  $P_{\phi} = 8,86 \cdot 10^{-8}$  Вт.

Для определения мощности помехи обратного рассеяния  $P_{nop}$ , обусловленной многократно рассеянным отраженным оптическим излучением при условии, что *z* » *b*, можно предположить, что *b* = 0, воспользуемся формулой (3):

$$P_{\Pi OP} = \left(\frac{\sigma \boldsymbol{x}_{\pi} \boldsymbol{c} \boldsymbol{t}_{uM}}{8\boldsymbol{n}}\right) \frac{P_0 K_{onm} \boldsymbol{r}_n^2 \boldsymbol{a}_n^2 \exp\left[-2\varepsilon \boldsymbol{z} \left(1-\boldsymbol{\Lambda}\right)\right]}{4\boldsymbol{\mu}^2 \boldsymbol{\Lambda} \varepsilon \boldsymbol{z}^3 + \left(\boldsymbol{a}_u^2 + \boldsymbol{a}_n^2\right) \boldsymbol{z}^2} = 1.77 \cdot 10^{-24} Bm.$$
(6)

## 3. Методика определения пространственночастотной характеристики АИС ПВ

Для оценки модуля передаточной функции (МПФ) активно-импульсной системы, используемой для регистрации видеоизображений подводных объектов, представим данную систему в виде составной (многоступенной) линейной изображающей системы, что позволит определить МПФ всей системы (системную МПФ) в виде произведения МПФ отдельных ее подсистем [5]:

где  $\hat{H}_{OC}(v)$  – ОПФ приемной оптической системы;

 $\hat{H}_{\mathcal{P}O\Pi}(v) - M\Pi \Phi \mathcal{P}O\Pi III +$  поколения;

 $\hat{H}_{_{DO}}(v)$  – ОПФ волоконнооптического фокона;

 $\hat{H}_{\rm KMO\Pi}(v)$  – МПФ матричного приемника оптического излучения (КМОП – матрицы);

 $\hat{H}_{2\pi}(v) - M\Pi\Phi$  электронного тракта;

 $\hat{H}_{_{MOH}}(v)$  – МПФ монитора (дисплея);

 $\hat{H}_{_{\Gamma\Pi}}(v)$  – зрительного анализатора.

Системная МПФ активно-импульсной системы регистрации видеоизображений характеризует каче-

68 ПОДВОДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РОБОТОТЕХНИКА. 2024. № 3 (49)

ство воспроизводимого на экране монитора подводного изображения, и наблюдатель оценивает качество этого изображения.

График результирующей МПФ образца АИС ПВ, получаемой перемножением МПФ всех составляющих звеньев системы по формуле (7), приведен на рис. 8.



Рис. 8. Результирующая МПФ макетного образца АИС ПВ

## 4. Методика определения гидрооптических характеристик и МПФ морской среды

В качестве примера, для значения прозрачности морской воды по белому диску  $z_{\delta} = 40 \ m$  согласно формуле [4]:

$$\varepsilon = \frac{4, 7...5}{z_{\sigma}} = 0,1225;$$
$$\Lambda = 0,955 - \frac{0,035}{\varepsilon} = 0,6692$$

находим вероятность выживания фотона  $\Lambda$ , а затем определяем показатель ослабления  $\varepsilon$ , показатель рассеяния  $\sigma$  и показатель поглощения  $k_{\pi}$ 

Далее по найденному значению σ по формулам [4]:

$$\varphi_0 = 10^{-3} \left( \frac{0,4+7,83+3,65^2}{0,955-0,03} \right) = 9,56 \cdot 10^{-3};$$

$$K_{ac} = \frac{1-\varphi_0}{\varphi_0} = 103,6;$$

$$\mu = \sqrt{\frac{\gamma^2}{6}} = 0,01156;$$

$$\gamma^2 = 0,021 + \frac{0,765}{1+K_{ac}} = 0,0283$$
  
 $x_{\pi} = \frac{2}{1+K_{cc}} = 0,019$ 

находим коэффициент асимметрии  $K_{ac}$  индикатрисы рассеяния  $x(\gamma)$  и рассчитаем интегральный параметр индикатрисы рассеяния  $\mu$ , значение индикатрисы рассеяния в направлении обратного рассеяния  $x_{\pi}$  и величину  $\varphi_{a}$ 

Значения гидрооптических характеристик морской среды для значения  $z_6 = 40$  м приведены в таблице 1 [6].

Таблица 1. Значения гидрооптических характеристик морской среды

Z <sub>ő,</sub> M	Λ	ε, M <sup>-1</sup>	σ, м-1	<i>k</i> <sub>п,</sub> м <sup>-1</sup>	$\varphi_0$	μ	Xπ
40	0,6692	0,125	0,084	0,041	0,01	0,0012	0,019

МПФ слоя рассеивающей и турбулентной морской среды определяются по формулам [5], которые для угловых пространственных частот можно записать в виде:

$$T_{M.p.}(\mathbf{v}') = exp\left[-\mathbf{z} + \frac{\mathbf{z}}{\sqrt{(2\pi\mu\mathbf{v}')^2 + 1}}\right] = exp\left(-3,346 + \frac{3,346}{\sqrt{(0,0075\mathbf{v}')^2 + 1}}\right)$$



Рис. 9. Результирующая МПФ слоя морской воды

$$T_{M.M.}(\mathbf{v}') = exp\left[-\frac{\left(\lambda \mathbf{v}' \mathbf{k}_n\right)^2 \Delta n^2 z}{3a}\right]$$

Для расчетов принимаем следующие значения:  $\Delta n^2 = 10^{-9}$ ; n = 1,34; a = 0,5[6]. Результирующая МПФ слоя морской воды приведена на рис. 9. При этом:  $T_{M}(v') = T_{M,p}(v') = T_{M,m}(v')$ 

## 5. Методика определения энергетических характеристик сигнальных и фоновых составляющих регистрируемого излучения

При работе АИС ПВ под водой необходимо осуществить стробирование по дальности, обусловленное наличием интенсивного обратного рассеяния излучения подсвета в морской воде. При этом длительность строба равна длительности зондирующего импульса. Другой особенностью энергетического расчета является наличие в фотоприемном устройстве высокоэффективного электронно-оптического преобразователя (ЭОП III+ поколения), осуществляющего многократное преобразование яркости подводных объектов на фоне донной поверхности.

Для проведения расчета потребуются паспортные характеристики ЭОП III+ поколения с «голубым» фотокатодом, которые приведены в табл. 2 [2].

Таблица 2. Паспортные характеристики ЭОП III+						
поколения						
Характеристика	Обозна- чение	Численное значение				

характеристика	чение	значение
Спектральная чувствительность фотокатода	$S^{p}_{_{\varphi\kappa}}$	100 мА/Вт
Интегральная чувствительность фотокатода	$S^{\pi}_{_{\varphi\kappa}}$	1800 мкФ/лм
Электронно-оптическое увеличение	Г	1
Световая отдача люминофора	γ	30 лм/Вт
Коэффициент усиления яркости	η	3.104

Изображение, формируемое на экране ЭОП III+ поколения, сопрягается с фоточувствительной поверхностью КМОП- матрицы волоконно-оптическим фоконом с линейным увеличением  $\beta = 1 : 2,2$  и коэффициентом пропускания  $\chi_{eb} = 0,6$ .

Далее определим числа фотоэлектронов, генерируемых в одном пикселе КМОП-матрицы регистрируемым излучением, от подводного объекта, фона и помех обратного рассеяния по формулам, приведенным в табл. 3 [4]. В этой же таблице приведены формулы для вычисления числа фотоэлектронов, формируемых в результате солнечной засветки.

Число фотоэлектронов	Расчетная формула		
n <sub>oõ</sub>	$\frac{P_0 t_{uv} S_{\phi ny} K_{onm} \rho_{o6} \alpha_n^2 r_n^2 \exp\left[-2\varepsilon z (1-\Lambda)\right] q_2}{4\mu^2 \Lambda \varepsilon z^3 + \left(\alpha_u^2 + \alpha_n^2\right) z^2} = \frac{0,1435 \cdot 10^5 \exp\left(-0.06 \cdot z\right)}{0,002352 \cdot z^3 + 0,000002274 z^2}$		
n <sub>¢</sub>	$\frac{P_0 t_{uu} S_{\phi ny} K_{onm} \rho_{\phi} \alpha_n^2 r_n^2 \exp\left[-2\varepsilon z (1-\Lambda)\right] q_2}{4\mu^2 \Lambda \varepsilon z^3 + \left(\alpha_u^2 + \alpha_n^2\right) z^2} = \frac{0,039 \cdot 10^5 \exp\left(-0,06 \cdot z\right)}{0,002352 \cdot z^3 + 0,000002274 z^2}$		
n <sub>nop</sub>	$\left(\frac{\sigma x_{\pi} c t_{u_{M}}}{8n}\right) \frac{P_{0} t_{u_{M}} S_{\phi m y} K_{onm} \alpha_{n}^{2} r_{n}^{2} \exp\left[-2\varepsilon z \left(1-\Lambda\right)\right]}{4\mu^{2} \Lambda \varepsilon z^{3} + \left(\alpha_{u}^{2}+\alpha_{n}^{2}\right) z^{2}} = \frac{0,0013 \cdot 10^{4} \exp\left(-0,06 \cdot z\right)}{0,002352 \cdot z^{3} + 0,000002274 z^{2}}$		







Рис. 11. Зависимость числа фотоэлектро-

в зависимости от дальности наблюдения от фона

нов в зависимости от дальности наблюдения от подводных объектов

Рис. 12. Зависимость числа фотоэлектронов в зависимости от дальности наблюдения от помехи обратного рассеяния

Графики, показывающие зависимость количества фотоэлектронов от дальности наблюдения от фона (донной поверхности), подводных объектов и помехи обратного рассеяния, приведены на рис. 10, 11 и 12 соответственно.

Для определения дальности действия АИС ПВ необходимо предварительно определить наблюдаемый и минимально разрешаемый контрасты.

Наблюдаемый контраст вычислим по формуле:

$$k_{o\delta.H.} = \frac{k_{o\delta}T_{M}(\nu')}{1 + 2n_{\Pi OP} / (n_{o\delta} + n_{\phi})},$$

где  $T_{M}(v') - M\Pi\Phi$  морской среды;  $k_{oo}$  – истинный контраст объекта на фоне.

Контраст объекта на фоне рассчитывается по формуле:

$$k_{o\delta} = \frac{\rho_{o\delta} - \rho_{\phi}}{\rho_{o\delta} + \rho_{\phi}},$$

где  $\rho_{\rm of}$  и  $\rho_{\rm d}$  – коэффициенты отражения объекта и фона, примем их значения соответственно равными 0,55 и 0,15.

Используя полученные значения, наблюдаемый контраст определяется по формуле:

$$k_{o \delta.n.} = \frac{0,55 \cdot \exp(-0,12(\nu'))}{1 + 2n_{\Pi O P} / (n_{o \delta} + n_{\phi})}.$$

Минимально разрешаемый контраст определяется как:

$$k_{\min}(\nu') = \frac{\pi}{16} \frac{\left(\frac{S}{N}\right)_{\scriptscriptstyle 60CNP.\, nop}}{T_{\scriptscriptstyle \Pi CB}(\nu')\sqrt{0,5(n_{\scriptscriptstyle o6}+n_{\scriptscriptstyle \phi}+n_{\scriptscriptstyle \Pi OP})}} \sqrt{\frac{\alpha_x \alpha_y}{t_{\scriptscriptstyle en}f_k}}(\nu'),$$

где (S/N)<sub>воспр.пор</sub> – пороговое воспринимаемое отношение сигнал/шум, равное 2,5; t<sub>гл</sub> – время инерции глаза, равное 0,2 с; а<sub>х</sub> и а<sub>v</sub> – размеры пикселя, которые равняются 8,3 мкм × 8,3 мкм;  $f_{\kappa}$  – частота следования импульсов, 1 кГц.

Используя полученные значения, определяем наблюдаемый контраст по формуле:

$$k_{min}(\nu') = \frac{0,34\nu'}{\exp(-0,33\cdot 10^{-6}\nu')\sqrt{0,5(n_{o\delta} + n_{\phi} + n_{\Pi OP})}}$$

Например, для выбранных вероятностей обнаружения и распознавания: 0.9 и 0.8 соответственно, количество периодов эквивалентной миры равняется  $N_{\rm offh} = 1,8$  и  $N_{\rm pach} = 12.$ 

Например, при критическом размере подводного объекта  $H_{_{\kappa\pi}} = 0,6$  м связь между угловыми пространственными частотами v' и дальностью видения *z* имеет следующий вид:

– для обнаружения объекта: v'=3 z рад<sup>-1</sup>;

- для распознавания объекта: v'=20 z рад<sup>-1</sup>.

Графики определения предельной дальности обнаружения и распознавания подводного объекта в Балтийском море с помощью АИС ПВ при стробировании приемного канала на основе быстродействующего высокоэффективного модуля типа ФПМ-5-1-Ф приведены на рис. 13 и 14.



Рис. 13. Определение предельной дальности обнаружения

Проведенные расчеты дальности действия АИС ПВ при использовании значений параметров макетного образца АИС ПВ, а также параметров подводного объекта и морской воды, показывают, что:

 – распознавание подводного объекта возможно на дальности 18,6 м, а обнаружение – на дальности 32,6 м;



Puc. 14. Определение предельной дальности распознавания

предельная дальность видения в морской воде
 в основном определяется показателем затухания
 зондирующего импульсного лазерного излучения и
 практически обратно пропорциональна показателю
 ослабления морской воды.

Необходимо отметить, что дальность видимости сильно зависит от конкретного водного бассейна. В табл. 4 приведены данные о дальности обнаружения «белого» диска в акваториях разных морей и оценка возможностей АИС ПВ.

Таблица 4. Дальности обнаружения «белого» диска

Регион	ε (м⁻¹)	<i>z</i> <sub>м</sub> (м)	L <sub>пред</sub> (М)	L' <sub>пред</sub> (м) (оценка)
Балтийское море	0,5	9,4	17	28
Черное море	0,3	15,6	28	44
Саргассово море	0,07	67	120	155
Открытый океан	0,1	47	84	113

Примечание.  $\varepsilon$  – коэффициент ослабления излучения лазерной подсветки;  $z_{\rm M}$  – дальность видимости «белого» в пассивном режиме подсветки;  $L_{\rm пред}$  – предельная дальность видимости АИС ПВ;  $L'_{\rm пред}$  (оценка) – максимально возможная дальность видимости АИС ПВ.

#### 6. Макетный образец АИС ПВ

Для экспериментального подтверждения в натурных условиях рассчитанных дальностей действия макетного образца АИС ПВ специалисты ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ» разработали и изготовили макетный образец системы, структурная схема которого приведена на рис. 15, а внешний вид – на рис. 16. В разработанном макетном образце АИС ПВ:

– регистрирующий канал на основе фотоприемного модуля типа ФПМ-5-1-Ф, разработанного и изготавливаемого ОАО «НПО Геофизика-НВ», в состав которого входят быстродействующий с высоким пространственным разрешением ЭОП III<sup>+</sup> поколения, чувствительный в спектральном диапазоне прозрачности морской воды, и крупноформатная цифровая КМОП-матрица, состыкованная волоконно-оптическим фоконом с ЭОП III<sup>+</sup> поколения;

 – канал для подсветки различных подводных объектов на основе быстродействующего малогабаритного импульсного Nd:YAG лазера с диодной накачкой типа «Tech-527 Advanced», излучающего в спектральном диапазоне прозрачности морской воды (на длине волны 527 нм);

 быстродействующий цифровой контроллер управления, осуществляющий формирование синхронизирующих и управляющих импульсов, посту-

#### СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ПОДВОДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ



Рис. 15. Структурная схема макетного образца АИС ПВ



Puc. 16. Внешний вид макетного образа АИС ПВ

1 – регистрирующий канал на основе ФПМ; 2 – импульсный лазер «Tech-527 Advanced» с оптической системой формирования подсвечивающего излучения; 3 – блок питания лазера «Tech-527 Advanced»; 4 – быстродействующий цифровой контроллер управления

пающих на фотоприемный модуль типа ФПМ-5-1-Ф и подсвечивающий импульсный Nd:YAG лазер типа «Tech-527 Advanced», осуществляющий распределение лазерных импульсов в стробе по заданному закону, позволяющему уменьшить влияние помехи обратного рассеяния от естественных оптических помех на изображение цели наблюдения;

– специализированный вычислитель, осуществляющий цифровую обработку изображений подводных объектов для восстановления изображений этих объектов и отображения их на высокоразрешающем мониторе, а также для формирования псевдообъемных изображений донной поверхности для управления подводными аппаратами и робототехническими комплексами. В настоящее время для проведения натурных испытаний завершаются работы по установке каналов АИС ПВ в глубоководные боксы.

## Заключение

Разработанные высокоэффективные импульсные твердотельные Nd:YAG лазеры с диодной накачкой, излучающие в спектральном диапазоне прозрачности морской воды, и быстродействующие ЭОП III+ поколения, высокочувствительные в спектральном диапазоне прозрачности морской воды, на основе которых созданы фотоприемные модули с чувствительной структурой «ЭОП III+ поколения – цифровая КМОП-матрица», а также использование других технических решений позволили ОАО «НПО ГЕОФИЗИКА-НВ» оптимально реализовать все достоинства подводного активно-импульсного наблюдения, обеспечивающие технологические и технические преимущества подводного видения.

Использование нового поколения лазерных активно-импульсных систем подводного видения в составе подводных аппаратов обеспечит решение таких перспективных задач, как: поиск затонувших объектов, проведение подводных поисково-спасательных работ, охрана морских коммуникаций, портовых сооружений, фарватеров, внутренних водных путей, выявление минной опасности, морских диверсантов, борьба с морским терроризмом, разведка полезных ископаемых, исследование шельфа морского дна, мониторинг трубопроводов, подводных кабелей и скважин, монтажные работы в мутной морской воде, ликвидация последствий аварий и др.

Результаты предстоящих экспериментальных испытаний макетного образца АИС ПВ в натурных условиях позволят оценить реальные возможности лазерных активно-импульсных оптико-телевизионных систем.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Волков В.Г. Активно-импульсные приборы ночного видения // Специальная техника. 2002. № 3. С. 2–11.

2. Грузевич Ю.К. Оптико-электронные приборы ночного видения. М.: Физматлит, 2014. 276 с. ISBN 978-5-9221-1550-6.

3. Мартынов В.Л., Краснопольский В.Е., Мальцев А.Б. Стробирующие лазерные телевизионные системы для подводных аппаратов // Судостроение. 2005. № 4. С. 45–49.

4. Карасик В.Е., Орлов В.М. Локационные лазерные системы видения. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 480 с. ISBN 978-5-7038-3667-5.

5. Мосягин Г.М. Теория оптико-электронных систем. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. 348 с. ISBN 978-5-7038-5260-6.

6. Долин Л.С., Левин И.М. Справочник по теории подводного видения. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 230 с. ISBN 5-286-00313-3.

#### Справка об авторах

**ГРУЗЕВИЧ Юрий Кириллович**, к.т.н., с.н.с., профессор, зам. генерального директора по научной работе

Открытое акционерное общество «Научно-производственное объединение ГЕОФИЗИКА-НВ»

Адрес: 107076, г. Москва, ул. Матросская Тишина, д. 23., стр. 2.

**Область научных интересов:** лазерные и оптико-электронные системы и приборные комплексы, ночное видение и тепловидение, твердотельная фотоэлектроника.

Тел.: +7 (499) 268-53-07, 268-16-96, факс: +7 (495) 603-08-87 E-mail: yukg@mail.ru

АЛЬКОВ Павел Сергеевич, к.т.н., доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы», зам. технического директора

Открытое акционерное общество «Научно-производственное объединение ГЕОФИЗИКА-НВ»

Адрес: 107076, г. Москва, ул. Матросская Тишина, д. 23., стр. 2.

Область научных интересов: оптико-электронные системы, преобразование сигналов в оптико-электронных системах.

Тел.: +7 (499) 268-13-81, факс: +7(495) 603-08-87

E-mail: pavel\_alkov@mail.ru

**БАЛЯСНЫЙ Лев Михайлович**, гл. конструктор ЭОП и ФПМ Открытое акционерное общество «Научно-производственное объединение ГЕОФИЗИКА-НВ».

Адрес: 107076, г. Москва, ул. Матросская Тишина, д. 23., стр. 2. Область научных интересов: квантовые фотоэлектронные приборы.

Тел.: +7 (499) 268-38-85, факс: +7(495) 603-08-87 E-mail: baliaska@mail.ru

ЧИСТОВ Олег Валерьевич, начальник сектора

Открытое акционерное общество «Научно-производственное объединение ГЕОФИЗИКА-НВ».

Адрес: 107076, г. Москва, ул. Матросская Тишина, д. 23., стр. 2. Область научных интересов: цифровая обработка изображе-

ний, электронные управляющие системы и устройства. **Тел.:** +7 (499) 268-38-85, **факс**: +7(495) 603- 08-87

E-mail: arkhont@mail.ru



#### **Для цитирования**:

Грузевич Ю.К., Альков П.С., Балясный Л.М., Чистов О.В. ЛАЗЕРНАЯ ОПТИКО-ТЕЛЕВИЗИОННАЯ АКТИВНО-ИМПУЛЬСНАЯ СИ-СТЕМА ПОДВОДНОГО ВИДЕНИЯ // Подводные исследования и робототехника. 2024. №. 3 (49). С. 62–75. DOI: 10.37102/1992-4429\_2024\_49\_03\_06. EDN: UKYORG. DOI: 10.37102/1992-4429\_2024\_49\_03\_06

# LASER OPTICAL-TELEVISION ACTIVE-PULSE UNDERWATER VISION SYSTEM

#### Yu.K. Gruzevich, P.S. Alkov, L.M. Balyasny, O.V. Chistov

The article is devoted to the practical application of the active-pulse observation method to provide underwater vision in conditions of diffusing seawater. The laser optical-television active-pulse underwater vision system (APS UV) developed for the implementation of this method, based on synchronized pulsed laser illumination of objects of observation and video recording by a specially developed optical-television camera based on a highly efficient photodetector module with a sensitive structure «Third+ Generation Image Intensifier Tube with extended blue-green spectral region – Digital CMOS-matrix», provides the formation of video images of underwater objects in seawater with the determination of the range to them.

A laser optical-television active-pulse underwater vision system (AIS PV) developed for the implementation of this method, based on synchronized pulsed laser illumination of underwater observation objects and video recording by a specially developed optical-television camera based on a highly efficient photodetector module with a sensitive structure "III+ generation electron-optical converter by – digital CMOS matrix", which provides the formation of video images of underwater objects in seawater with the determination of the range to them.

The article provides information on the physical prerequisites for the technical implementation of underwater vision in scattering seawater, as well as information on technical solutions for creating key elements of APS UV that can increase the range of vision by cutting off back scattering interference when observing in seawater. This advantage distinguishes APS UV from conventional optical television systems, in which back scattering is superimposed on the resulting image of the object, significantly reducing the range of vision and the quality of the resulting image.

The results of the work performed are aimed at increasing the contrast of the image of the observed underwater object and, consequently, the range of vision of the APS UV.

The article describes the developed model of the APS UV.

**Keywords:** active-pulse system, image intensifier tube, photodetector module, pulsed laser, back scattering interference.

#### References

1. Volkov V.G. Aktivno-impul'snye pribory nochnogo videnija. Special'naja tehnika. 2002. No. 3. P. 2–11. (In Russ.).

2. Gruzevich Ju.K. Optiko-jelektronnye pribory nochnogo videnija. M.: Fizmatlit, 2014. 276 p. ISBN 978-5-9221-1550-6. (In Russ.).

3. Martynov V.L., Krasnopol'skij V.E., Mal'cev A.B. Strobirujushhie lazernye televizionnye sistemy dlja podvodnyh apparatov. Sudostroenie. 2005. No. 4. P. 45–49. (In Russ.).

4. Karasik V.E., Orlov V.M. Lokacionnye lazernye sistemy videnija. M.: Izd-vo MGTU im. N.Je. Baumana, 2013. 480 p. ISBN 978-5-7038-3667-5. (In Russ.).

5. Mosjagin G.M. Teorija optiko-jelektronnyh sistem. M.: Izd-vo MGTU im. N.Je. Baumana, 2020. 348 p. ISBN 978-5-7038-5260-6. (In Russ.).

6. Dolin L.S., Levin I.M. Spravochnik po teorii podvodnogo videnija. L.: Gidrometeoizdat, 1991. 230 p. ISBN 5-286-00313-3. (In Russ.).



## Information about the authors

- **GRUZEVICH Yuriy Kirillovich**, Candidate of Technical Sciences, senior researcher, Professor of the Department «Laser and Optoelectronic Systems», Deputy General Director on Science
- Open Joint Stock Company «Scientific and Production Association GEOPHIZIKA-NV»
- Address: 107076, Moscow, Matrosskaya Tishina str., 23, bld. 2
- **Phone:** +7 (499) 268-53-07, 268-16-96, **fax:** +7 (495) 603-08-87
- E-mail: yukg@mail.ru
- **Research interests:** laser and optoelectronic systems and instrument complexes, night vision, thermal imaging, solid-state photoelectronics.
- ALKOV Pavel Sergeyevich, Candidate of Technical Sciences, Assistant professor, Deputy Technical Director
- Open Joint Stock Company «Scientific and Production Association GEOPHIZIKA-NV»
- Address: 107076, Moscow, Matrosskaya Tishina str., 23, bld. 2
- Phone: +7 (499) 268-13-81, fax: +7 (495) 603-08-87
- E-mail: pavel alkov@mail.ru
- **Research interests:** optical-electronic systems, signal conversion in optical-electronic systems/
- BALYASNY Lev Mikhaylovich, chief developer IIT and PMT
- Open Joint Stock Company «Scientific and Production Association GEOPHIZIKA-NV»
- Address:107076, Moscow, Matrosskaya Tishina str., 23, bld. 2
- **Phone:** +7 (499) 268-38-85, **fax:** +7 (495) 603-08-87

E-mail: baliaska@mail.ru

Research interests: Quantum photoelectronic devices

#### CHISTOV Oleg Valer'yevich, head of department

Open Joint Stock Company «Scientific and Production Association GEOPHIZIKA-NV»

Address:107076, Moscow, Matrosskaya Tishina str., 23, bld. 2

**Phone:** +7 (499) 268-38-85, **fax:** +7 (495) 603-08-87

E-mail: arkhont@mail.ru

**Research interests:** digital image processing, electronic control systems and devices.

