

Л.Е. Арушанян, В.Г. Атанесян, Т.А. Геворкян, А.А. Назарян,  
А.А. Франгян, А.А. Цовян

## Использование оптического хронографа для глубинных исследований природных водоемов

Армяно-греческое акционерное общество закрытого типа «Лазерная Техника–Пиркал», г. Ереван

Поступила в редакцию 24.07.2002 г.

С помощью высокочувствительной камеры К-008 зарегистрированы изображения тест-объектов различной формы и размеров, находящиеся на различных глубинах в водах с различными гидрооптическими характеристиками. Получены зависимости контраста изображения и величины сигнала, отраженного от объекта, от глубины расположения объекта, коэффициента его отражения, угловых размеров. Получено удовлетворительное согласие с теоретическими расчетами. Натурные испытания были проведены на оз. Севан.

Методы лазерного дистанционного зондирования находят самое разнообразное применение в исследовании Мирового океана [1, 2]. Этими методами определяются первичные гидрооптические характеристики (ПГХ) морской воды, исследуются их тонкая структура и пространственно-временная изменчивость. Введение в такие системы (см., например, [3]) канала, формирующего изображения, расширяет круг подобных исследований. Это представляется крайне важным с точки зрения как фундаментальной науки, так и прикладных задач, в том числе экологических, геологических и др.

При наблюдении подводных объектов одной из основных характеристик является контраст изображения – главная проблема для видения на больших глубинах. С целью увеличения контраста, как правило, используется стробирование обратного сигнала.

Мощность принимаемого отраженного сигнала при ориентации системы наблюдения на середину объекта складывается из трех составляющих [4]:

$$P_I = P_{об} + P_{bs}^o + P_{bs}^e, \quad (1)$$

где  $P_{об}$  – мощность излучения, отраженного поверхностью объекта;  $P_{bs}^o$  – мощность помехи обратного рассеяния из толщи среды, расположенной перед объектом;  $P_{bs}^e$  – мощность помехи обратного рассеяния из толщи среды, расположенной за объектом (с учетом его экранирующего действия).

При ориентации системы наблюдения на область среды вне объекта выражение для принимаемой мощности имеет вид

$$P_{bs} = P_{bs}^o + P_{bs}^{\infty}, \quad (2)$$

где  $P_{bs}^{\infty}$  – мощность помехи обратного рассеяния из толщи среды, расположенной за объектом (без учета экранирующего действия объекта).

Формула для определения контраста изображения объекта на фоне среды записывается следующим образом [4]:

$$K = (P_I - P_{bs}) / (P_I + P_{bs}). \quad (3)$$

Эти соотношения позволяют провести анализ характера поведения контраста изображения объекта в зависимости от параметров объекта, системы наблюдения и характеристик среды, что и являлось целью настоящего исследования.

Собранная лазерная экспериментальная установка позволяла регистрировать изображения объектов, расположенных на разных глубинах. Исследовались зависимости контраста изображения объекта от глубины погружения, его угловых размеров, коэффициента отражения поверхности объектов, от ПГХ воды.

Мощность выходного излучения на второй гармонике импульсного YAP:Nd-лазера менялась в пределах 0 – 200 мДж; длительность лазерного и стробирующего импульсов ~ 12 нс; телесный угол подсветки варьировал в пределах  $10^{-3}$  – 0,5 рад; телесный угол обзора – в пределах 0,1–0,5 рад; чувствительность – 0– $10^{-12}$  Вт; время экспозиции –  $10^{-7}$ – $10^{-8}$  с; скорость линейной развертки  $10^{-7}$ – $10^{-9}$  с/см. Регистрация изображений осуществлялась с помощью высокочувствительного электронно-оптического хронографа К-008 [6], который позволял регистрировать и измерять пространственно-временные параметры быстротекающих процессов как в однокадровом режиме, так и в режиме линейной развертки исследуемого изображения. Регистрация и обработка изображений осуществлялись с помощью персонального компьютера с соответствующим программным обеспечением.

В ходе исследований были проведены серии натурных и лабораторных измерений.

Натурные измерения проводились на оз. Севан при следующих условиях эксперимента: угол падения луча на границу раздела равнялся примерно  $67^\circ$ , расстояние от системы наблюдения до поверхности воды  $\sim 50$  м, максимальная глубина погружения объекта (по трассе луча) 13,5 м, длина волны лазерного излучения 540 нм, длительность лазерного и стробирующего импульсов  $\sim 12$  нс, плотность энергии  $10$  мДж/м<sup>2</sup>. Исследовались объекты диаметром  $\sim 240$  мм шарообразной и цилиндрической форм (высота цилиндра 700 мм). ПГХ воды определялись по диску Секки [5].

На рис. 1 показаны характерные кадры, полученные на оз. Севан. Кадр (а) получен в режиме линейной развертки, когда угловой размер поля наблюдения больше угловых размеров объекта. Объект – шар диаметром 240 мм, коэффициентом отражения  $R \sim 0,3$ , расположенный на глубине 7 м. Кадр (б) получен в однокадровом режиме. В данном кадре – объект цилиндрической формы с распределенным коэффициентом отражения поверхности [5] на глубине 4 м.

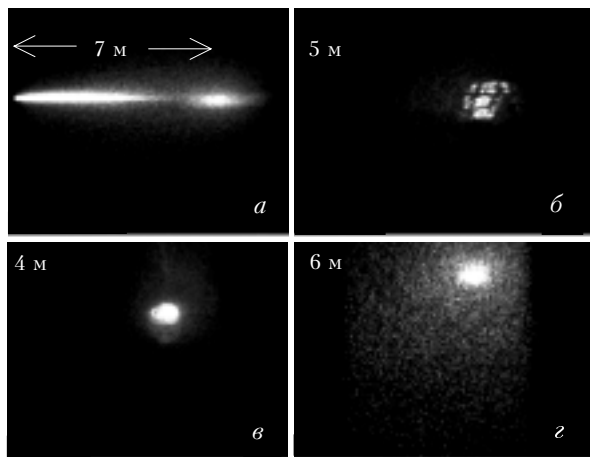


Рис. 1. Характерные изображения объектов, полученные при натурных исследованиях. Прозрачность по диску Секки – 6 м: а – изображение шара диаметром 240 мм (коэффициент отражения  $R \sim 0,3$ ), находящегося на глубине 7 м, полученное в режиме линейной развертки (скорость развертки 30 нс/см). Диаметр пятна на поверхности воды  $\sim 100$  мм. Слева направо: момент касания луча границы раздела среды – левый край ярко выраженной эллиптической фигуры; ярко выраженный эллипс больших размеров – прохождение луча в гидросфере (участок трассы 7 м от границы объекта); меньших размеров эллипс – объект. Вся засвеченная область на кадре за исключением самого объекта – фоновая область обратного рассеяния; б – разваленное под действием волны изображение шара – изображение раздроблено, в нем появились разрывы, искажена форма объекта; в – изображение объекта цилиндрической формы, диаметр основания которого равен 240 мм, высота 700 мм, расположенного на глубине 4 м. Коэффициент отражения торцевой части  $\sim 0,3$ . Боковая поверхность объекта – равной толщины полосы белого ( $R \sim 0,3$ ) и черного ( $R \sim 0,01$ ) цвета; з – изображение объекта шарообразной формы диаметром 240 мм, полученное с предельной глубины видимости

Развал изображения [5] объекта шарообразной формы под влиянием взволнованной поверхности воды показан на кадре (б) – изображение дробится, в нем появляются разрывы, форма объекта искажается. На кадре (з) – изображение объекта шарообразной формы, полученное с предельной глубины видимости, что составляло по диску Секки 6 м. Наблюдается частичный развал изображения [5].

Экспериментально полученная кривая зависимости контраста изображения  $K$  шарообразного объекта диаметром 240 мм от глубины  $h$  при натурных исследованиях показана на рис. 2 (плотность энергии на поверхности воды была примерно  $10$  мДж/м<sup>2</sup>, угловой размер поля наблюдения больше угловых размеров объекта, коэффициент отражения объекта  $R \sim 0,3$ ).

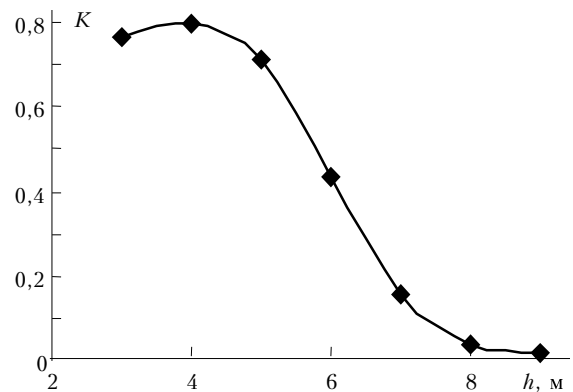


Рис. 2. Зависимость контраста изображения объекта  $K$  от глубины нахождения объекта  $h$  (в качестве объекта использовался белый шар диаметром 240 мм, коэффициент отражения которого  $\sim 0,3$ ; прозрачность по диску Секки  $\sim 6$  м)

Наблюдается характерный спад контраста, что удовлетворительно совпадает с расчетной кривой [4]. Рассчитанное по этим данным значение показателя ослабления воды  $\epsilon \sim 0,56$  м<sup>-1</sup> хорошо совпадает с полученным из непосредственных измерений по диску Секки [5].

На рис. 3а в верхнем ряду представлены изображения шарообразных объектов, расположенных на глубине 4 м, имеющих одинаковый угловой размер 5 мрад, но разные коэффициенты отражения поверхностей  $R$ , значения которых указаны на рисунке. Соответственно в нижнем ряду под изображениями объектов показаны изображения их теней, полученные с глубины 7 м. На этих кадрах заметно влияние коэффициента отражения на контраст изображения и величину углового размера тени.

Экспериментальная зависимость контраста изображений тех же объектов и их теней при сканировании лучом по глубине показана на рис. 3б: на глубине 2 м видно касание объектов передним фронтом луча, на 4 м – наблюдается максимальный контраст изображения, а на глубине 6 м – касание объекта задним фронтом луча (попадание луча под объект в область тени). На графике отчетливо видна разная зависимость величины контраста изображения тени

(начиная с глубины 6 м, соответствующей глубине по диску Секки) от глубины для различных коэффициентов отражения поверхностей объектов, о чем ранее нигде не сообщалось. В теоретических расчетах [4] влияние изменения коэффициента отражения не учитывается вообще.

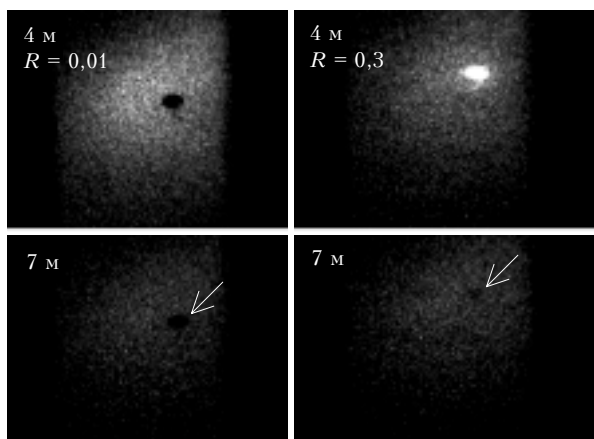


Рис. 3а. Изображения объектов с разными коэффициентами отражения  $R$  и их теней: верхний ряд – изображения черного ( $R \sim 0,01$ ) и белого ( $R \sim 0,3$ ) шаров диаметром 240 мм, находящихся на глубине 4 м; нижний ряд – изображения их теней, полученные с глубины 7 м

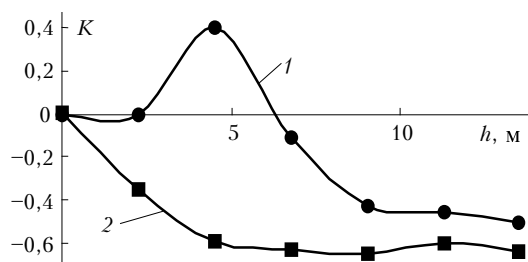


Рис. 3б. Зависимость контраста изображения объекта и его тени  $K$  от глубины  $h$ : кривая 1 – зависимость  $K(h)$  для белого шара диаметром 240 мм с коэффициентом отражения  $\sim 0,3$  и его тени; кривая 2 – зависимость  $K(h)$  для черного шара того же размера с коэффициентом отражения  $\sim 0,01$  и его тени; прозрачность по диску Секки в обоих случаях  $\sim 6$  м, начиная с глубины 6 м и далее – тень объекта

В лабораторных условиях водоемом служила труба длиной 33 м, диаметром 0,7 м, изнутри покрытая специальной краской, коэффициент отражения которой на длине волны эксперимента  $\sim 1\%$ , а потому реального влияния в качестве вторичного источника подсветки оказывать не могла. В качестве мишеней использовались плоские (толщиной 0,5 мм) объекты прямоугольной формы различных размеров ( $100 \times 80$ ,  $280 \times 115$  мм и др.) с коэффициентами отражения, варьируемыми в диапазоне от 0,02 до 0,5. Длина волны лазерного излучения 540 нм, длительность лазерного и стробирующего импульсов  $\sim 12$  нс, плотность энергии 10 мДж/м<sup>2</sup>, падение лазерного излучения на водную поверхность близко к вертикальному. ПГХ воды для лабораторной установки измерялись фото-

метром. Регистрация изображений осуществлялась тем же методом, что и при натуральных испытаниях.

На рис. 4а показаны изображения объекта прямоугольной формы в зависимости от глубины, полученные на лабораторной установке при прозрачности воды по диску Секки 15 м. На глубине 15 м наблюдался полный развал изображения. На рис. 4б – 4г показаны полученные в лабораторных условиях зависимости контраста изображения от различных параметров.

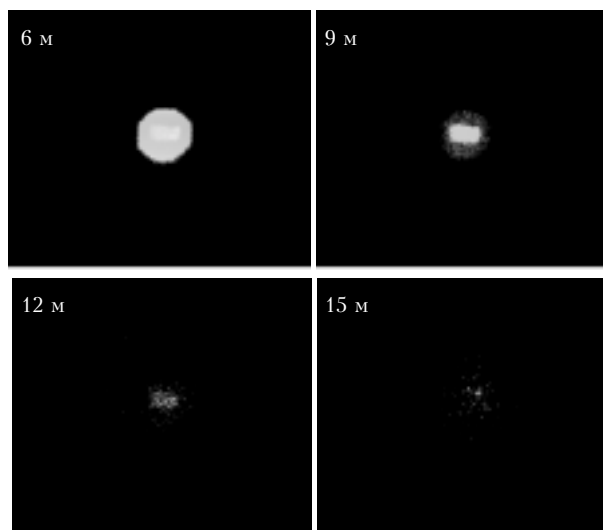


Рис. 4а. Изображения прямоугольного объекта, полученные в лабораторном эксперименте с глубин 6, 9, 12, 15 м. Прозрачность по диску Секки  $\sim 15$  м

Из рис. 4б видно, что с глубиной наблюдается рост значения контраста изображения для объектов с разными коэффициентами отражения.

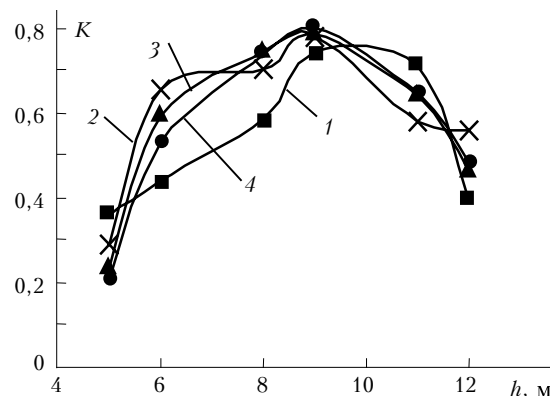


Рис. 4б. Зависимость контраста изображения  $K$  от глубины  $h$  для объектов с разными коэффициентами отражения  $R$ : кривая 1 –  $R \sim 0,02$ ; 2 –  $R \sim 0,05$ ; 3 –  $R \sim 0,2$ ; 4 –  $R \sim 0,25$ . Прозрачность воды по диску Секки в этом эксперименте  $\sim 11$  м, размер объекта  $100 \times 80$  мм

На глубине 9 м, что составляет  $\sim 0,8$  от глубины диска Секки, он достигает максимального значения, далее зависимость имеет спадающий характер. Такое

поведение контраста характерно для объектов с коэффициентом отражения, превышающим эффективный коэффициент отражения [4] строблируемого слоя среды. На рис. 4в показана зависимость контраста изображения от глубины для объектов разных размеров.

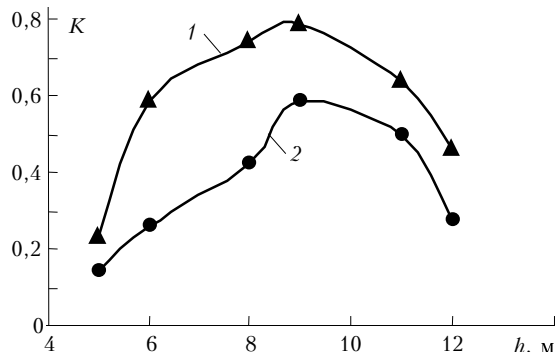


Рис. 4в. Зависимость контраста изображения  $K$  от глубины  $h$  для объектов с разными размерами (коэффициент отражения обоих объектов  $R \sim 0,20$ , прозрачность воды по диску Секки  $\sim 11$  м): кривая 1 –  $100 \times 80$  мм; 2 –  $280 \times 115$  мм

Размер освещаемого пятна на поверхности воды для всех объектов один и тот же, коэффициент отражения  $\sim 0,2$ . Видно, что характер поведения контраста в этом случае один и тот же, однако контраст изображения объектов с малыми размерами всегда больше контраста изображений объектов, имеющих больший размер.

Рис. 4г иллюстрирует зависимость контраста изображения объектов одинаковых размеров от глубины для разных значений показателя ослабления воды  $\epsilon$ . Видно, что при уменьшении показателя ослабления среды увеличивается скорость как роста, так и спада контраста.

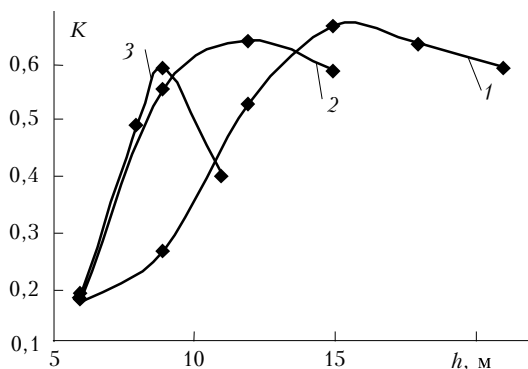


Рис. 4г. Зависимость контраста изображения  $K$  от глубины  $h$  для разных значений показателя ослабления воды  $\epsilon$  (коэффициент отражения всех объектов  $R \sim 0,2$ , размер  $280 \times 115$  мм): кривая 1 –  $\epsilon = 0,27 \text{ м}^{-1}$ ; 2 –  $\epsilon = 0,36 \text{ м}^{-1}$ ; 3 –  $\epsilon = 0,46 \text{ м}^{-1}$

Абсолютное значение максимума контраста наблюдается на глубине порядка 0,8 от предельной глубины видимости, однако для объектов одного и того же типа на предельной глубине максимум возможен для среды с более высокой прозрачностью.

На рис. 5а и 5б показаны полученные в лабораторных условиях зависимости отраженного от объек-

та полезного сигнала  $S$  и фона  $F$  изображения, измеренных в относительных единицах, от глубины для различных значений коэффициентов отражений поверхности объекта (плотность энергии на поверхности воды примерно та же –  $10 \text{ мДж/м}^2$ , угловой размер поля наблюдения больше угловых размеров объекта, прозрачность воды по диску Секки 11 м). На рис. 5а наблюдается монотонный характер поведения зависимости полезного сигнала от глубины (для разных коэффициентов отражения объектов).

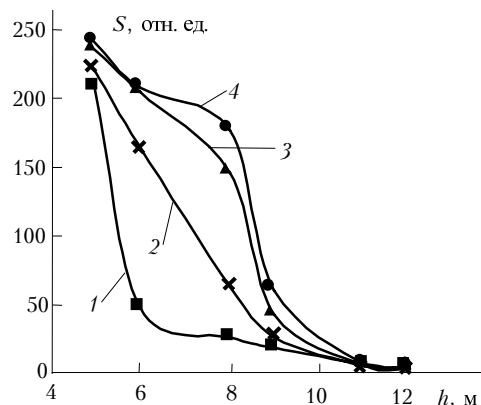


Рис. 5а. Зависимость полезного сигнала  $S$  от глубины  $h$  для объектов с разными коэффициентами отражения  $R$  (размер всех объектов  $100 \times 80$  мм, прозрачность воды по диску Секки  $\sim 11$  м): кривая 1 –  $R \sim 0,02$ ; 2 –  $R \sim 0,05$ ; 3 –  $R \sim 0,2$ ; 4 –  $R \sim 0,25$

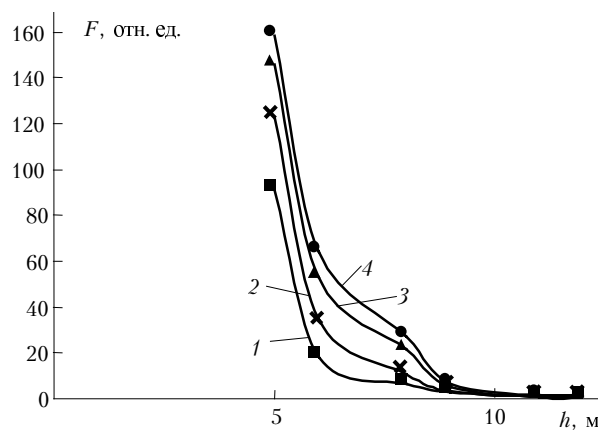


Рис. 5б. Зависимость фона  $F$ , создаваемого объектом, от глубины  $h$  для объектов с разными коэффициентами отражения  $R$  (размер всех объектов  $100 \times 80$  мм, прозрачность воды по диску Секки  $\sim 11$  м): кривая 1 –  $R \sim 0,02$ ; 2 –  $R \sim 0,05$ ; 3 –  $R \sim 0,2$ ; 4 –  $R \sim 0,25$

Таким образом, на основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что характер поведения контраста объектов, наблюдаемых с помощью систем видения с широкой диаграммой направленности, что имело место при натурных испытаниях, является монотонно спадающим. Величина контраста подобъектной (теневой) зоны зависит от коэффициента отражения объекта. Контраст изображения объектов, наблюдаемых с помощью систем видения с узкой диаграммой направленности (в лабораторных условиях),

имеет немонотонный характер. Наблюдается рост контраста с уменьшением размеров объекта для систем с узкой диаграммой. Максимального значения контраст достигает на глубине порядка 0,8 от предельной глубины видения. Скорость роста и спада контраста зависит от прозрачности среды. Для объектов с высоким коэффициентом отражения вблизи границы исчезновения изображения наблюдается рост величины полезного сигнала и контраста при уменьшении толщины стробируемого слоя среды.

1. *Межерис Р.* Дистанционное лазерное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.

2. *Кондратьев К.Я., Поздняков Р.В.* Оптические свойства природных вод и дистанционное зондирование фитопланктона. Л.: Наука, 1988. 181 с.
3. *Аветисян В.М. и др.* Бортовой лазерный спектрофлуориметр для дистанционного зондирования земной поверхности // Исслед. Земли из космоса. 1988. № 3. С. 81–86.
4. *Вебер В.Л., Долин Л.С.* О контрасте изображений мало-размерных объектов, наблюдаемых через рассеивающую среду посредством системы с активной подсветкой // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12. № 4. С. 297–302.
5. *Долин Л.С., Левин И.М.* Справочник по теории подводного видения. Л.: Гидрометеониздат, 1991. 229 с.
6. <http://www.bifo.ru>

*L.E. Arushanyan, V.G. Atanesyan, T.A. Gevorkyan, A.A. Nazaryan, A.A. Frangyan, A.A. Tsovyan.* **Utilization of the optical chronograph for deep investigation of water reservoirs.**

A high sensitive K-008 camera was used for making images of test objects of various shapes and size, located at different depths in water with various hydro-optical characteristics. Dependences of image contrast and signals reflected from an object on the depth of the object location, its reflection coefficient and angular size have been obtained. Satisfactory agreement with theoretical calculations was achieved. Field measurements were carried out in Lake Sevan.