

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 535:778.38

В.В. Демин, А.В. Макаров, И.Г. Половцев

Регистрация планктона с помощью имитатора погружаемой голографической камеры

Томский государственный университет

Поступила в редакцию 28.09.2005 г.

Для исследования объектов, находящихся в их естественной среде (например, планктон, оседающие частицы в воде), целесообразно применять методы подводной импульсной голографии, которые, обладая достаточным разрешением и глубиной сцены, позволяют за одну экспозицию получать информацию о каждой частице всего исследуемого объема.

Разработана конструкция, названная имитатором погружаемой голографической камеры, которая по своей идеологии представляет собой автономный лабораторный макет рабочей погружаемой голографической камеры в натуральную величину. Имитатор предназначен для разработки методики проведения подводной голографической съемки, отработки технологии сборки погружаемой голографической камеры, юстировки оптической схемы, процессов записи голограммы, зарядки кассеты с фотопластинами, смены кадра, регламентных работ с лазерной системой и т.п.

Приведены результаты экспериментов по регистрации модельных частиц, а также движущихся планктонных частиц, находящихся в воде. Регистрируемый объем составляет около 1 л (при длине объема 500 мм), разрешение — 200 мкм. Обсуждены проблемы ввода голографических изображений в ЭВМ и их численной обработки с целью повышения качества и выделения границ объектов.

Введение

Регистрация объемных ансамблей частиц актуальна в различных областях науки и техники, например при решении таких задач, как измерение размеров частиц и концентрации различных аэрозолей в лабораторных и природных условиях [1, 2], исследование двухфазных потоков [3], изучение процесса взаимодействия лазерного излучения с аэрозолем [4], наблюдение планктона в водной среде [5, 6]. В публикациях [1–7] обоснована целесообразность использования для этих целей голографических методов. Голографические методы не возмущают исследуемый объем и при достаточном разрешении и глубине сцены позволяют за одну экспозицию зарегистрировать информацию обо всех частицах объема. При этом с одной голограммы получают информацию как о каждой частице в отдельности (размер, форма), так и обо всем ансамбле (концентрация частиц, их взаимное расположение в пространстве).

В работах [8, 9] показана возможность определения показателя преломления частиц правильной формы (сфера, эллипс, цилиндр) по их голографическим изображениям, что принципиально расширяет возможности голографии объемных ансамблей частиц. Наконец, использование импульсной голографии позволяет регистрировать движущиеся частицы.

Все вышеперечисленные возможности голографических методов, принципиально недостижимые другими методами, обусловили интерес к использованию импульсной голографии для исследо-

вания подвижных частиц в жидкости, особенно планктона в естественной среде обитания. Информация о форме и размерах планктонных частиц, возможность разрешения мелких деталей обеспечивают их идентификацию. Данные о пространственном распределении, концентрации, перемещениях частиц позволяют изучать видовое разнообразие и состояние планктона. Это, в свою очередь, дает возможность оценивать экологическое состояние водной экосистемы, а также на основании сведений о планктоне как важнейшем звене пищевой цепочки экосистемы прогнозировать рост рыбной популяции.

Известны две погружаемые голографические камеры [10–13], которые использовались для природных исследований планктона. Камера HOLOCAM [12, 13] позволяет одновременно регистрировать осевую и внеосевую голограммы одного и того же объема среды, обеспечивает большой угол обзора голографического изображения каждой частицы. Здесь во внеосевой схеме используется освещение объема «на отражение». Поэтому источником является импульсный лазер с высокой энергией (около 1 Дж) и, как следствие, камера характеризуется большой массой (более 2 т) и габаритами. Получаемая же информация избыточна для многих вышеперечисленных задач. Как правило, для измерения размеров, концентрации, расположения частиц и их идентификации можно обойтись измерением их сечений и не исследовать голографические изображения в широком диапазоне углов наблюдения.

Это характерно, например, для планктона оз. Байкал, с небольшим видовым разнообразием.

В то же время здесь нет судов, обеспечивающих работу с тяжелыми спускаемыми аппаратами, что ограничивает возможности исследований лишь работой со льда. Поэтому актуальны как разработка погружаемой голографической камеры с меньшими массогабаритными параметрами, так и отработка методик идентификации частиц планктона по их сечениям.

С целью уменьшения размеров и массы камеры, а также требуемой энергии импульсного лазера мы остановились на внеосевой схеме с переносом изображения и реализацией предметного пучка на просвет [7]. При разработке камеры мы базируемся на отработанных в НИПИокеангеофизика конструктивных решениях, которые позволяют существенно увеличить глубину погружения аппаратов. Особенности голографической регистрации при помощи погружаемой камеры, результаты численного моделирования и расчетов оптической схемы переноса изображения, результаты лабораторного моделирования оптической схемы голографирования, а также примеры голографических изображений приведены в [7, 14–16].

Имитатор погружаемой камеры

Прежде чем приступить к описанию имитатора, кратко напомним функциональную схему погружаемой голографической камеры [7]. Часть оптической схемы находится в основном прочном цилиндрическом корпусе, вторая часть — в двух выносных цилиндрических штангах. Прочный корпус и штанги расположены взаимно перпендикулярно. В состав камеры входят еще два прочных цилиндрических корпуса (лазерный и интерфейсный боксы), расположенных с двух сторон от основного (вдоль него) и предназначенных для размещения лазера, источника питания и центрального контроллера. Исследуется объем между двумя выносными штангами, представляющий собой цилиндр диаметром 50 мм и длиной 500 мм. Исследуемый объем находится на расстоянии около 700 мм от основного прочного корпуса для минимизации турбулентного возмущения.

Для разработки методики проведения подводной голографической съемки, отработки технологии сборки погружаемой голографической камеры, юстировки оптической схемы, процессов записи голограммы, зарядки кассеты с фотопластинами, смены кадра, регламентных работ с лазерной системой и т.п., изготовлена конструкция, названная нами имитатором погружаемой голографической камеры (рис. 1).

По своей идеологии имитатор представляет собой автономный лабораторный макет погружаемой голографической камеры в натуральную величину. Лазерный бокс, основной прочный корпус и обе штанги (передающая и приемная) заменены здесь отрезками труб соответствующего диаметра, установленных на общее основание. Кювета с водой (длина 500 мм), расположенная между штангами и просвечиваемая предметным пучком, имитирует

исследуемый объем. Интерфейсный бокс в имитаторе не представлен, так как источник питания и центральный контроллер, которые в нем располагаются, не предполагают механической юстировки и настройки.

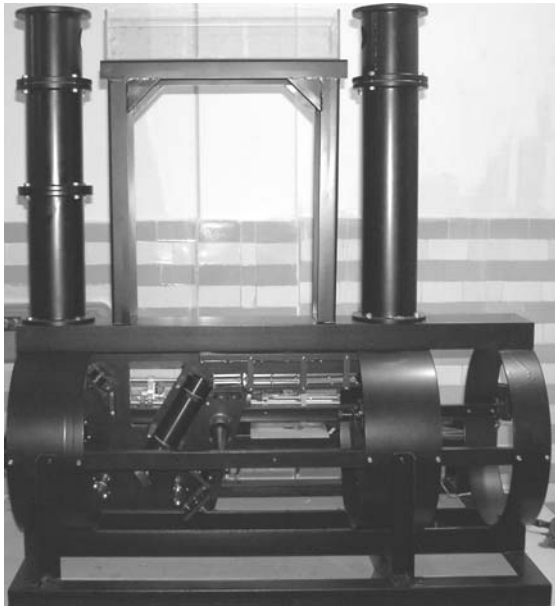
Все узлы, которые монтируются внутри корпусов имитатора, предполагается после апробации и доработки устанавливать в погружаемом (рабочем) варианте голографической камеры.

Таким образом, в имитаторе полностью реализована оптическая схема погружаемой голографической камеры, разработанная нами ранее [7].

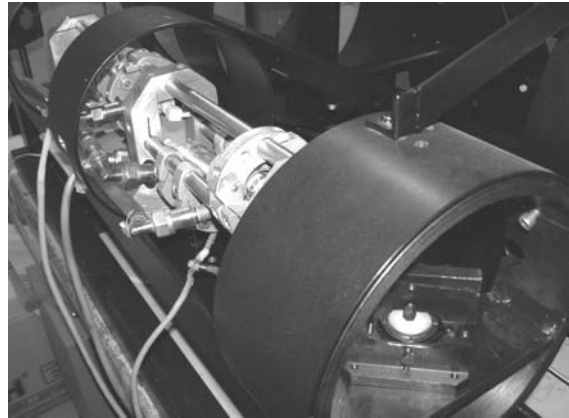
Лазерный пучок с помощью поворотного зеркала 1 направляется на светоделитель 2. Излучение, прошедшее сквозь делитель, расширяется с помощью телескопической системы Галилея 3 до диаметра 50 мм, освещает (на просвет) кювету с водой 5, в которой находятся исследуемые объекты, и попадает на систему переноса изображения 6. Система 6 представляет собой телескопическую систему Кеплера и переносит изображение исследуемого объема в область перед фотопластиной 8. Ее применение в погружаемом голографическом аппарате позволяет увеличить глубину сцены. Излучение, отраженное делителем 2, после последовательного отражения от системы поворотных зеркал попадает на коллиматор 4 (идентичный 3), где формируется в опорный пучок. После выхода из коллиматора пучок диаметром 50 мм, пройдя систему зеркал 7, освещает фотопластину 8 под углом 30°. Назначение системы зеркал, так же как и в схеме погружаемой камеры, — направить опорный пучок под заданным углом к фотопластине, обеспечив при этом необходимое пространство для механизма хранения и подачи фотопластин. Оптические элементы опорного пучка смонтированы на выдвижной плите, вид которой представлен на рис. 1, д. Технические решения плиты, держателей и используемых оптических элементов обеспечивают минимальную разъюстировку оптической схемы имитатора при извлечении плиты и последующей установке на место.

В имитаторе используется АИГ-лазер с пассивным затвором, выполненным из кристалла LiF с F²-центрами окраски, с последующим усилителем и преобразователем излучения во вторую гармонику (кристалл КТР). В лазере используется диафрагма для выделения одной поперечной моды, резонансный отражатель (стопа) в качестве выходного зеркала, что обеспечивает требуемую длину когерентности. Выходная энергия, полученная в экспериментах, невысока и составляет порядка 30 мДж. Однако рассчитанные и изготовленные на минимум потерь оптические элементы голографической схемы, а также использование предметного пучка «на просвет» позволили ограничиться этой энергией.

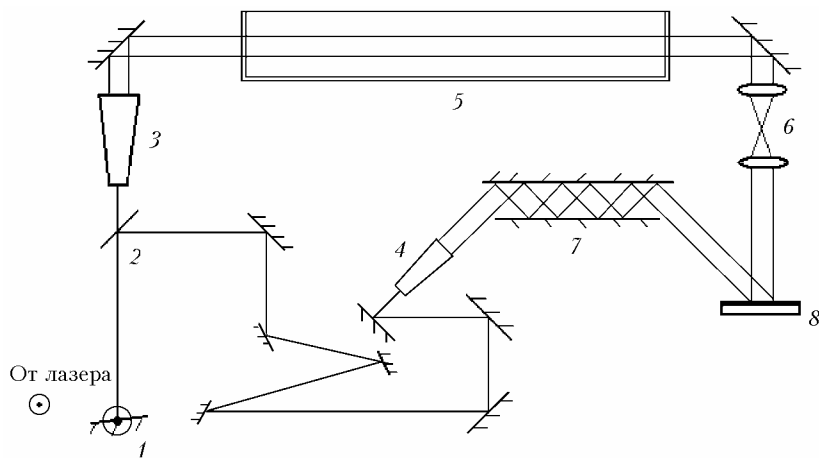
Проведенные с использованием имитатора эксперименты показали, что этой энергии достаточно для регистрации голограмм по схеме рис. 1. (Напомним, что в работах [5, 6, 12, 13] использовался



a



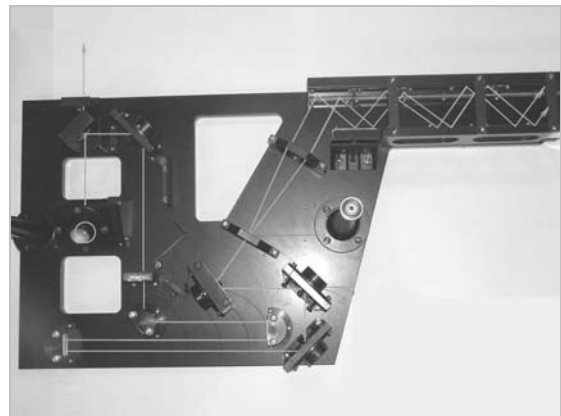
б



в



г



д

Рис. 1. Общий вид имитатора (*a*, *б*) и его схема (*в*); блок формирования опорного пучка: *г* – в составе имитатора; *д* – отдельно от имитатора; светлой линией показан ход лучей; *в* – 1 – поворотное зеркало; 2 – светоделиитель; 3, 4 – коллиматоры (телескопическая система Галилея); 5 – стеклянная кювета, имитирующая исследуемый объем; 6 – оптическая система переноса изображения (телескопическая система Кеплера); 7 – система зеркал; 8 – фотопластина

лазер с энергией на порядок больше.) Особенно интересными используемого лазера являются компактность и простота конструкции и, как следствие, его устойчивость к механическим воздействиям. В то же время здесь предусмотрена, при необходимости, установка телескопа и второго усилителя. Внешний вид лазера, установленного в имитаторе лазерного бокса, приведен на рис. 1,б.

Эксперимент

В экспериментальных исследованиях в качестве объектов использовались: проволока диаметром 450 мкм, живые движущиеся особи *Tubifex* (диаметр около 800 мкм), планктонные частицы оз. Байкал. Объекты находились в кювете с водой (5, рис. 1,в) на различных расстояниях (50, 250 и 450 мм) от выходного окна кюветы.

После экспозиции и фотохимической обработки записанные голограммы восстанавливались на отдельном лабораторном стенде, оптическая схема которого представлена на рис. 2.

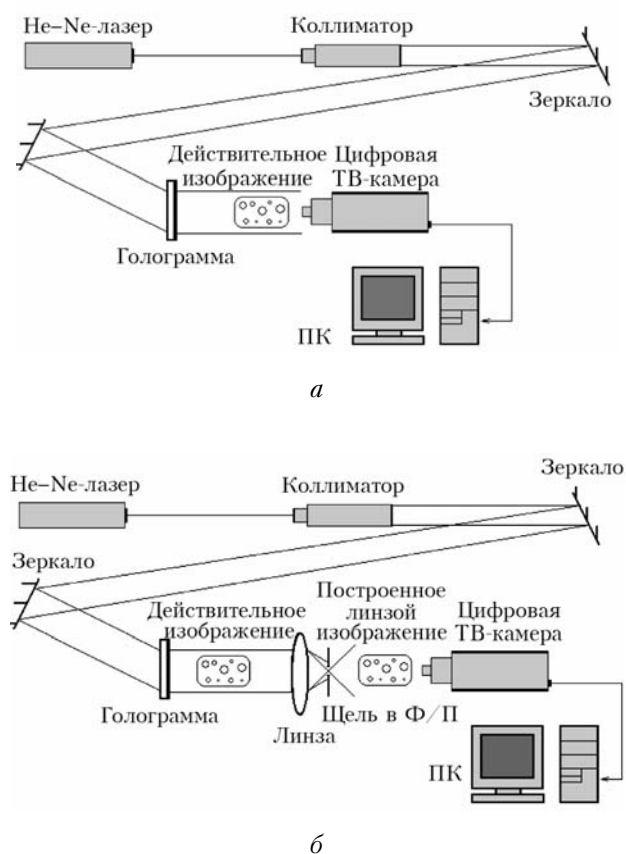


Рис. 2. Схема восстановления голографических изображений (а); схема с фильтрацией пространственных частот (б)

В качестве источника излучения использовался He-Ne-лазер, работающий в режиме непрерывной генерации; на выходе из коллиматора пучок расширялся до диаметра 50 мм. Два поворотных зеркала

обеспечивают точную настройку угла падения восстанавливающего пучка на голограмму по наилучшему качеству восстанавливаемого изображения. Восстановленные действительные голографические изображения исследуемых объектов можно было наблюдать с помощью микроскопа и/или записывать в память компьютера в цифровом формате (BMP-файл) с помощью системы ввода голографических изображений. В состав системы ввода входила цифровая ПЗС-камера с разработанной нами насадкой, позволяющей устанавливать микрообъективы с различным увеличением, и видеокарта с интерфейсом S-Video, предназначенная для захвата видеосигнала.

На рис. 3 приведены фотографии отдельных плоскостей восстановленных объемных голографических изображений движущихся в воде особей *Tubifex* (рис. 3,а), а также планктонных частиц (рис. 3,б) при различных увеличениях.

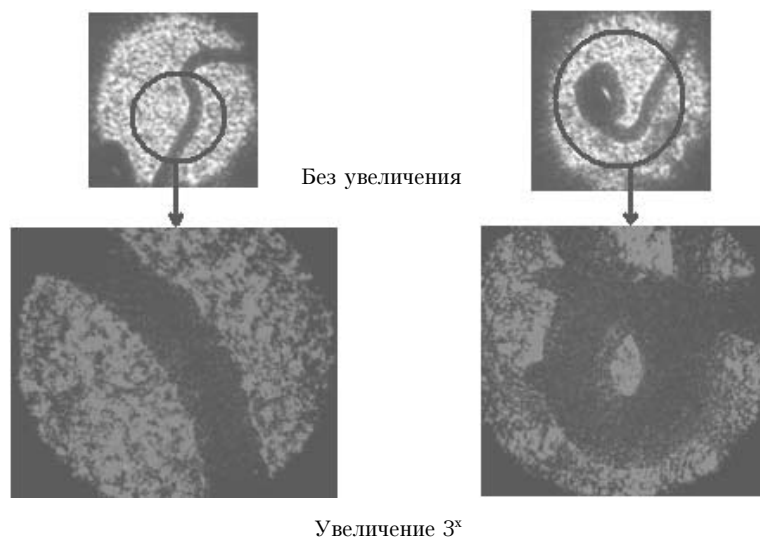
Исходя из известных размеров этих биологических объектов, можно сказать, что достигнутое разрешение составляет 200 мкм, это соответствует результатам расчетов [7]. На рис. 4 представлены фотографии восстановленных голографических изображений модельных 100-мкм объектов, находящихся в воде на расстоянии 50 (а), 250 (б) и 400 мм (в) от выходного окна кюветы.

Как уже отмечалось, важным параметром восстановленных голографических изображений является их контраст. Для повышения контраста восстанавливаемых изображений аппаратным способом применялась фильтрация пространственных частот на этапе восстановления. Для реализации этого метода в оптическую схему (см. рис. 2,а) была добавлена линза, в фокальной плоскости которой помещалась щель (см. рис. 2,б).

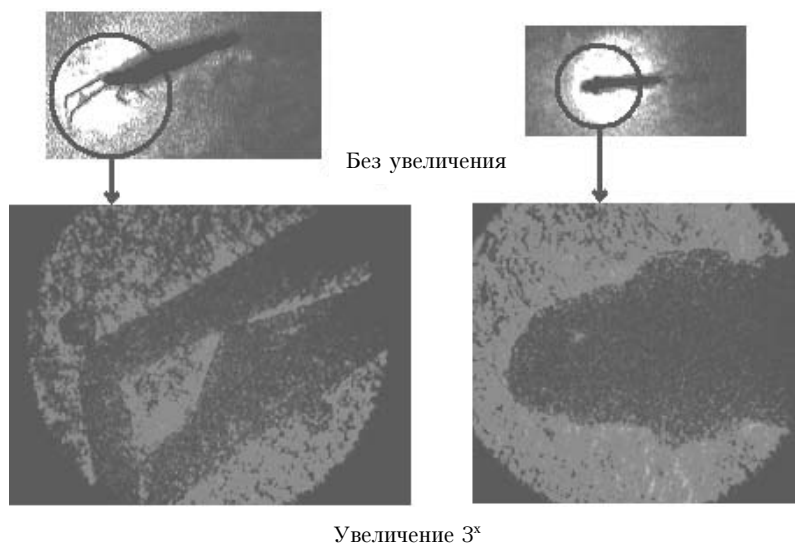
Использование системы ввода голографических изображений позволяет проводить их дальнейшую обработку численными методами. На рис. 5 показаны результаты обработки восстановленных изображений фильтром пространственных частот как аппаратно, так и программно, с использованием численной фильтрации.

Очевидно, что численная обработка предпочтительнее по сравнению с аппаратной, поскольку предоставляет больше возможностей для подбора параметров фильтрации, не требует дополнительной оптической схемы. Следует отметить, что численная обработка имеет свои ограничения, связанные с вычислительными ресурсами, с ограниченностью массива данных с ПЗС-камеры и т.д.

Для идентификации живых объектов, зарегистрированных с помощью голографических методов, необходимо определить их форму, а для этого требуется автоматически (полуавтоматически) выделить границу изображения. После повышения контраста восстановленных изображений к ним можно применить алгоритм для выделения границ исследуемых объектов. Примеры работы алгоритма приведены на рис. 5.



a



б

Рис. 3. Восстановленные голографические изображения: *a* – действительное голографическое изображение особи *Tubifex* (диаметр ~800 мкм), движущейся в воде; *б* – восстановленные голографические изображения планктонных частиц оз. Байкал

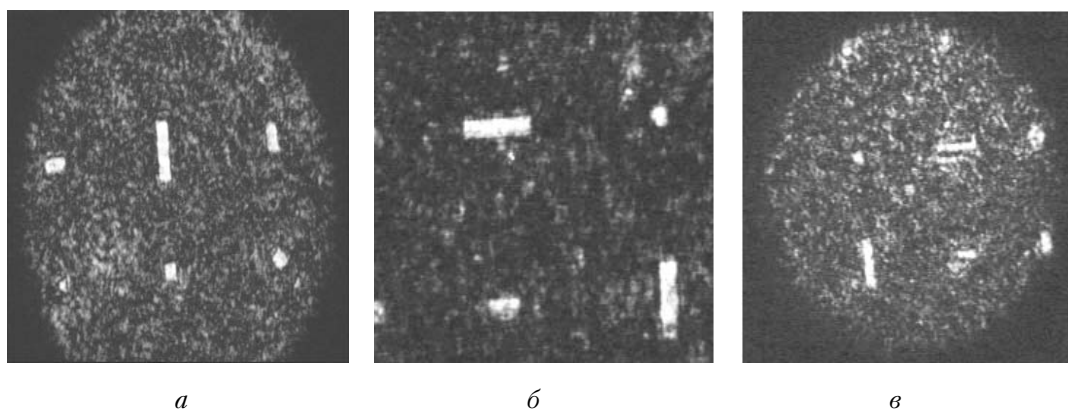


Рис. 4. Восстановленные голографические изображения модельных объектов

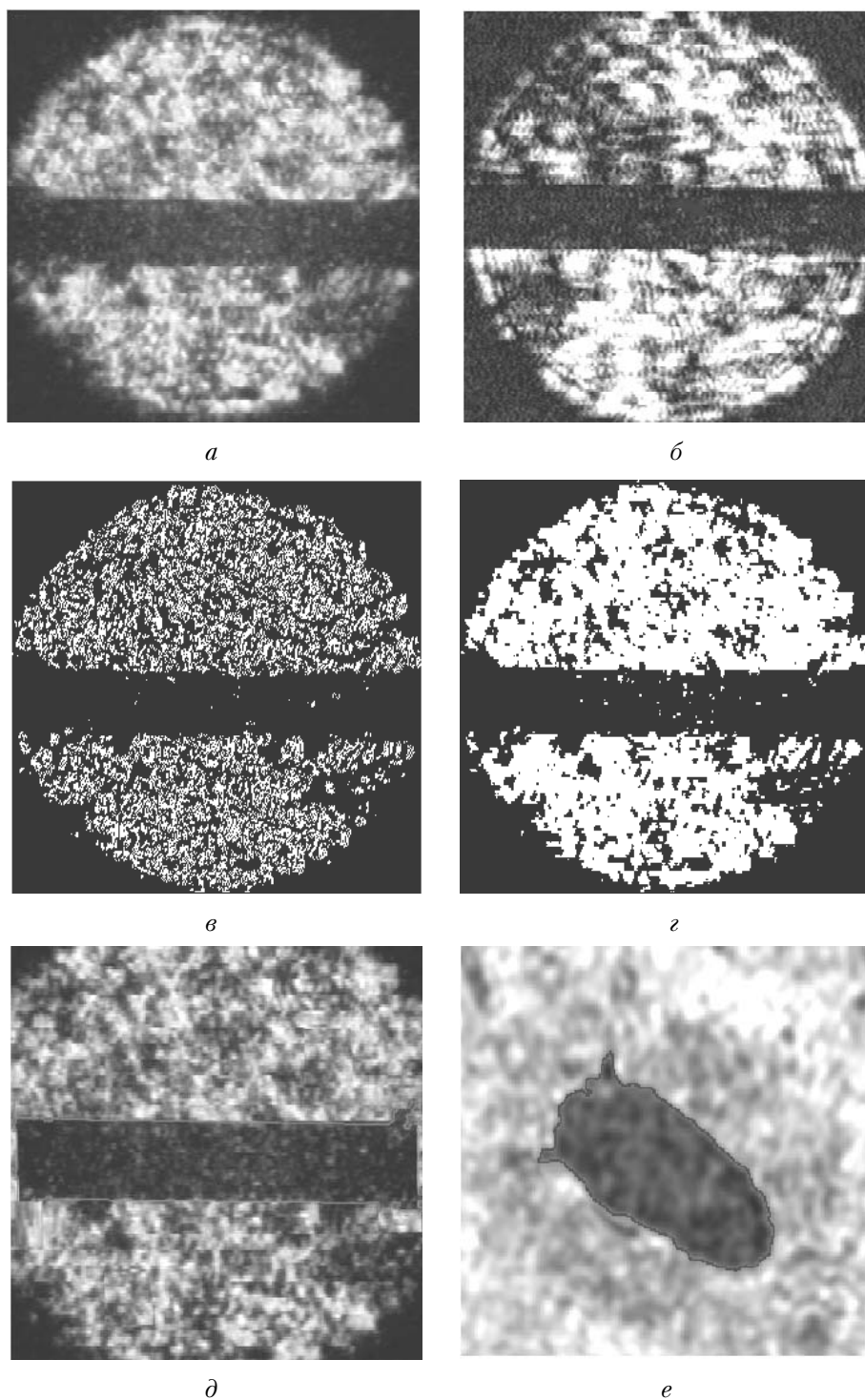


Рис. 5. Примеры аппаратной и численной обработки голографических изображений, включая выделение границ: *a* – исходное изображение; *б* – результат аппаратной обработки по схеме рис. 2,б; *в* – численная обработка градиентным фильтром; *г* – численная обработка фильтром Собеля; *д*, *е* – результаты работы алгоритма по выделению границ

Заключение

Регистрация голограмм при помощи разработанного имитатора позволила подтвердить предварительные расчетные оценки разрешения (200 мкм) и глубины сцены (500 мм) погружаемой голографической камеры для исследования планктона.

Экспериментально выяснено, что требуемая энергия лазерного источника может быть ограничена 30 мДж, что на порядок меньше энергии источника в аналогичных камерах. Проведенные эксперименты показали необходимость выработки оптимальной процедуры ввода и обработки объемных голографических изображений.

1. Демин В.В., Степанов С.Г. Исследование ориентационных характеристик модельных кристаллических аэрозолей голографическим методом // Оптика атмосфер. и океана. 2000. Т. 13. № 9. С. 833–836.
2. Демин В.В., Донченко В.А., Чистякова Л.К. Голографическая диагностика микроструктуры водного аэрозоля // Сиб. физ.-техн. ж. (Изв. СО РАН). 1992. Вып. 2. С. 70–72.
3. Шорин В.П., Журавлёв О.А., Логак Л.Г., Мединская Л.Н., Федосов А.И. Голографическая установка для изучения двухфазных потоков // Приборы и техн. эксперим. 1985. № 5. С. 158–161.
4. Демин В.В., Донченко В.А., Чистякова Л.К. Голографические исследования микроструктуры аэрозоля при воздействии наносекундных импульсов излучения // Оптика атмосфер. 1988. Т. 1. № 4. С. 57–63.
5. Foster E., Watson J. Holography for underwater inspection and measurement: an overview of current work // Opt. & Laser Technol. 1997. V. 29. N 1. P. 17–23.
6. Hobson P.R., Krantz E.P., Lampitt R.S., Rogerson A., Watson J. A preliminary study of the distribution of plankton using hologrammetry // Opt. & Laser Technol. 1997. V. 29. N 1. P. 25–33.
7. Демин В.В., Половцев И.Г., Макаров А.В., Мазур В.А., Тарасенко А.А., Ковбасюк Н.Н., Мельник Н.Г. Погружаемая голографическая камера для исследования микрочастиц: проблемы и решения // Оптика атмосфер. и океана. 2003. Т. 16. № 9. С. 846–855.
8. Голографический способ определения показателя преломления частиц дисперсных сред: Пат. № 2124194. Россия, G01N21/45. Демин В.В.; № 94043766; Заявл. 13.12.94. Зарегистр. в Гос. реестре изобретений РФ 27.12.98.
9. Демин В.В., Степанов С.Г. Голографические исследования прозрачных микрочастиц // Оптика атмосфер. и океана. 1998. Т. 11. № 7. С. 671–676.
10. Katz J., Donaghay P.L., Zhang J., King S., Russell K. Submersible holocamera for detection of particle characteristics and motions in the ocean // Deep-Sea Res. 1999. V. 46. N 1. Pt. 1. P. 1455–1481.
11. Malkiel E., Alquaddoomi O., Katz J. Measurements of plankton distribution in the ocean using submersible holography // Meas. Sci. and Technol. 1999. V. 10. P. 1142–1152.
12. Watson J., Alexander S., Graig G., Hendry D.C., Hobson P.R., Lampitt R.S., Marteau J.M., Nareid H., Player M.A., Saw K., and Tipping K. Simultaneous in-line and off-axis subsea holographic recording of plankton and other marine particles // Meas. Sci. and Technol. 2001. V. 12. P. L9–L15.
13. Hobson P.R., Watson J. The principles and practice of holographic recording of plankton // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2002. V. 4. P. S34–S49.
14. Демин В.В., Мазур В.А. Численное моделирование процесса голографирования частиц, расположенных в жидкости // Оптические методы исследования потоков: Тр. VII Междунар. научно-техн. конф. / Под ред. Ю.Н. Дубинцева, Б.С. Ринкевичюса. Москва, июль, 2003. М.: Изд-во МЭИ, 2003. С. 272–275.
15. Демин В.В., Макаров А.В. Лабораторные исследования голографической схемы для подводной регистрации частиц // Там же. С. 276–279.
16. Симонова Г.В., Демин В.В., Половцев И.Г. Оптическая система переноса изображения частиц для подводного голографирования // Там же. С. 280–283.

V.V. Dyomin, A.V. Makarov, I.G. Polovtsev. **Plankton detection with the use of a simulator of submersible holographic camera.**

To study small particles in their natural medium (for example, plankton or water-settling particles), it is reasonable to make use of methods of sub-water pulse holography, which, due to sufficient resolution and scene depth allow taking information on each particle of the whole volume of the medium under study for one exposition.

A construction, called a simulator has been worked out, which is an autonomous laboratory model of a full size working submersible holographic camera. The simulator is intended for elaboration of methods of underwater holographic exposing, improving the technology of assembling the camera, adjusting the optics, recording the hologram, loading photoplate holder, changing frames, maintenance of laser system, and so on.

Results of experiments on recording model particles and moving in water plankton particles are presented. The recorded volume is about 1 liter (at a volume length of 500 mm), a resolution is of 200 micrometers. Preliminary results of holographic images input into computer and their numerical processing aiming at improving the quality and distinguishing the object boundaries are presented.