

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ
ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.465

МОРСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ЦИФРОВОГО
ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО МОДУЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

© 2018 г. В. В. Дёмин^{1, *}, А. Л. Оленин^{1, 2, **}, И. Г. Половцев^{1, ***},
Д. В. Каменев¹, А. С. Козлова¹, А. С. Ольшук¹

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

*e-mail: dyomin@mail.tsu.ru

**e-mail: olenant@hotmail.com

***e-mail: polovcev_i@mail.ru

Поступила в редакцию 27.04.2017 г.

Представлены результаты морских испытаний цифрового голографического модуля для регистрации и измерений зоопланктона. Испытания выполнены летом 2016 г. в акватории Карского моря с помощью разработанной ранее в ИО РАН измерительно-технологической платформы с борта НИС “Академик Мстислав Келдыш” (66-й рейс). Осуществлены зондирования до 240 м с успешной записью около 100 Гб цифровых голографических кадров с привязкой к глубине, с одновременным измерением электропроводности, *in situ*. Испытаниями, проведенными в условиях реальной летней морской арктической экспедиции ИО РАН, подтверждена правильность заложенных технических решений. По результатам сформулирован перечень необходимых модернизаций голографического модуля для успешного внедрения в практику океанологических исследований.

DOI: 10.1134/S0030157418050027

ВВЕДЕНИЕ

Традиционно регистрация и анализ *in situ* размерно-количественного состава зоопланктона решается взятием проб сетями с требуемых горизонтов и рутинной ручной лабораторной обработкой. Важнейшей задачей является максимальная автоматизация этого процесса и создание бесконтактных измерительных средств для зоопланктона, работающих *in situ* в режиме реального времени. Несмотря на определенные преимущества, видеорегистраторы планктона *in situ*, не получили широкого распространения в океанологической практике. Основными причинами этого являются:

– некорректный пересчет количества пятен и теней, регистрируемых приборами, в количество частиц зоопланктона,

– недоступность режима получения визуальной информации, приемлемой для планктонолога, в реальном масштабе времени, по причине отсутствия в океанологической практике канала передачи данных с необходимой производительностью (~1 Гб/с).

Статья посвящена морским испытаниям экспериментального макета цифрового голографического модуля, созданного при выполнении проектов, реализованных в рамках федеральной целевой

программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы”. Работы выполнялись совместно сотрудниками ТГУ и ИО РАН во время экспедиции в Карское море на НИС “Академик Мстислав Келдыш”.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

В настоящее время основным средством прямых океанологических измерений являются многоканальные информационно-измерительные комплексы зондирующего, буксируемого или автономного применения. Ключевым в них является набор измерительных каналов (датчиков с их каналами связи), преобразующих измеряемые величины в аналоговый или цифровой информационный сигнал, удобный для дальнейшей обработки. Основные термины и определения, касающиеся океанологических приборов как измерительных инструментальных средств, освещены в [21, 24, 28].

Если для стандартных гидрофизических параметров датчики и их каналы достаточно хорошо отработаны, то для анализа размерно-количественного состава частиц взвеси, а тем более для определения видового состава зоопланктона, они практически отсутствуют. Для замены традици-

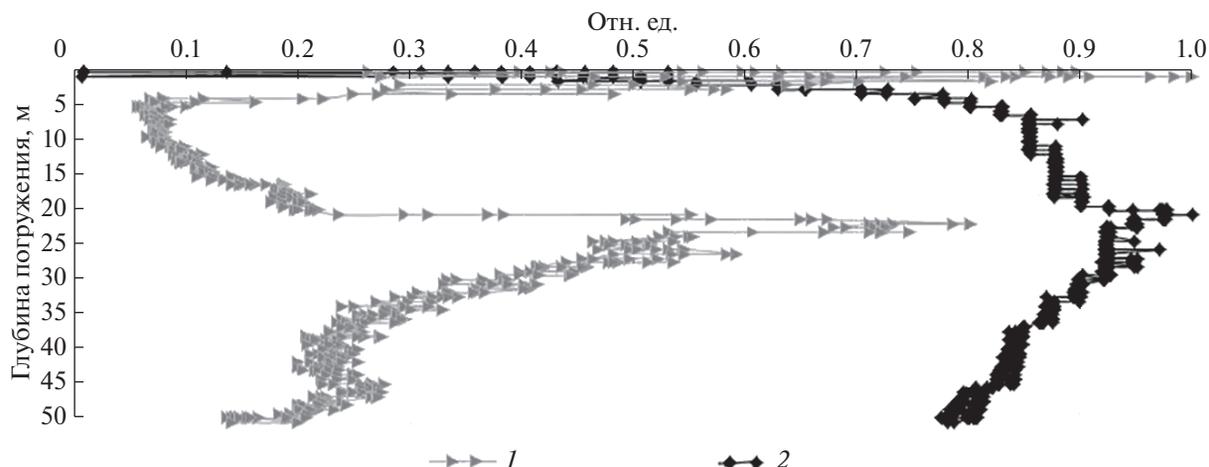


Рис. 1. Характерный график вертикального распределения мезопланктона в Черном море по данным от 26.08.2012 г. [32]. 1 — Флюориметр, 2 — интегральный измеритель биомассы (планктонометр).

онного забора проб сетями с требуемых горизонтов и исключения рутинной ручной лабораторной обработки [1, 33] в разное время созданы различные экспериментальные приборы для автоматизированного исследования планктона *in situ*, но никакие из них не получили широкого признания у океанологов [21, 34, 59]. Следует отметить серию гидробиологических зондов ТРАП разработки ВНИРО. Это зонды “ТРАП-4А”, “ТРАП-4”, в которых отцеженный сетью планктон проходит через проточный канал датчика для определения концентрации взвешенных в воде частиц по пяти размерным группам [18, 22, 51–53]. Дальнейшим развитием явился датчик ТРАП-7 [20, 23]. Формирование измерительного объема выполнено здесь только оптическим способом, что позволило отказаться от концентрирующей планктонной сети и регистрировать частицы размером 0.5–10 мм сканируя по 2–7 л/с в практически невозмущенной среде. Однако, идентификация того, что измеряется в этом случае в виде интегральной оценки концентрации взвеси, требует, по меньшей мере, применения сопутствующих измерений параметров эффективной биомассы с помощью иных, например флюориметрических методик. Так, на рис. 1, приведен результат измерений биомассы, в сопоставлении с данными флюориметра [32]. График измерителя планктона [27] показывает высокий уровень биомассы в верхних слоях акватории Черного моря. В то же время, флюориметр указывает на высокое содержание фитопланктона. Таким образом, несмотря на прямые измерения, разделить различные таксономические группы сообщества с помощью устройств подобных ТРАП не представляется возможным.

В Лаборатории радиофизических и оптических методов изучения окружающей среды Национального исследовательского Томского государственного университета с 2000 г. ведутся работы

по цифровой голографической регистрации частиц [2–5, 9–11, 13, 14, 17, 26, 37, 38, 43, 45]. В них голография используется как невозмущающий метод прямого измерения, с помощью которого с высоким разрешением получается информация о каждой частице (планктонной особи, оседающей неорганической частице, капле нефти, пузырьке газа и т.п.), содержащейся в заданном объеме водной среды.

Современные технологии позволяют использовать ПЗС-камеру в качестве средства регистрации картины интерференции опорной и предметной волн. Такой процесс регистрации голограмм на ПЗС-камеру и последующего численного восстановления из них изображения получил название цифровой голографии. На рис. 2 изображена осевая схема записи цифровых голограмм Габора или осевых голограмм [19]. Луч лазера, проходящий через коллиматор, образуя пучок необходимого сечения, далее проходит сквозь объем с исследуемыми частицами. В результате формируется картина интерференции опорной (часть излучения, которая прошла мимо частиц) и предметной (часть излучения, рассеянная на частицах) волн. Камера регистрирует эту интерференционную картину и передает ее в память компьютера [49, 50, 56–58]. Дальнейшая математическая обработка специальными вычислительными алгоритмами позволяет восстановить пространственное распределение частиц в исследуемом объеме (трехмерные координаты каждой частицы), определить размеры, форму, скорость и направление движения каждой частицы и провести их распознавание [40–42, 44].

Анализ мирового опыта исследовательских и поисковых разработок показал, что цифровые голографические методы являются высокоинформативными и экспериментальные образцы погружаемых цифровых голографических установок разрабатываются и используются для ис-

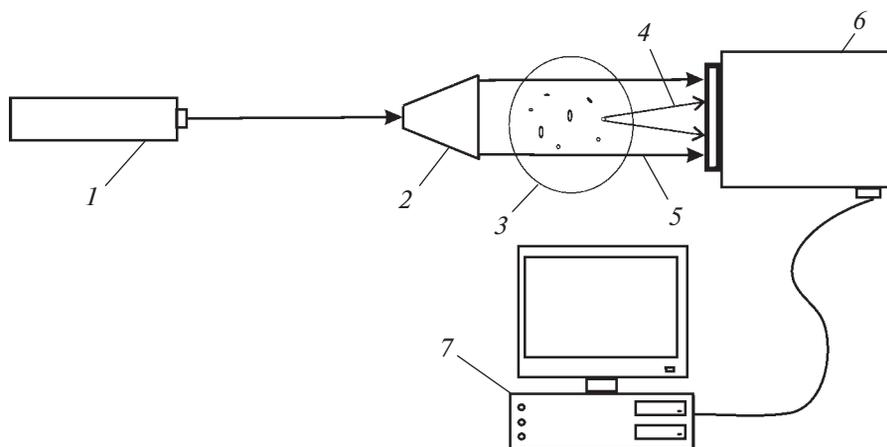


Рис. 2. Осевая схема регистрации цифровых голограмм “на просвет”. 1 – Лазер, 2 – оптическая система для формирования освещающего пучка, 3 – исследуемый объем с частицами, 4 – излучение, рассеянное на частицах (предметная волна), 5 – излучение, прошедшее без рассеяния на частицах (опорная волна), 6 – ПЗС-камера, 7 – персональный компьютер.

следования зоопланктона в различных странах мира [35, 39, 46–48, 54, 55, 60–62].

Основные преимущества методов цифровой голографии:

- детальное исследование каждой частицы, достаточное для ее идентификации, в большом по сравнению с размерами частиц объеме среды;
- получение информации о пространственном положении, ориентации, форме каждой частицы в режиме реального времени;
- построение 3D траектории движения каждой частицы.

Поэтому цифровая голографическая камера для исследования частиц в среде обитания (*in situ*) является основой для создания средств измерения – датчиков (сенсоров) морских планктонных частиц, выполняющих функции регистраторов, определителей и счетчиков для решения различных задач океанологии, исследования биоразнообразия, биологии, рыбного хозяйства, экологии, в том числе задач раннего предупреждения развития экологических катастроф.

Для комплексного анализа планктона в среде обитания, в качестве сопровождения такого средства измерений должны быть использованы датчик давления, датчик температуры, а также датчик электропроводности (например, микроволновой датчик проводимости (МММ)), поскольку их данные показывают корреляционную связь с датчиком планктона.

Описание используемого комплекса аппаратуры.

В рамках одного из ранее упомянутых проектов ФЦП был разработан и изготовлен экспериментальный макет цифрового голографического модуля (МЦГМ), являющийся составной частью аппаратно-программного комплекса (АПК) мониторинга растворимых и нерастворимых примесей в природных водных объектах [6–8, 12, 15, 16, 36].

Функциональная схема МЦГМ показана на рис. 3. Основные его части – это расположенные в двух прочных глубоководных корпусах с иллюминаторами и разъемами лазерный освещающий блок и приемный блок со smart-камерой, соединенные линией синхронизации.

Один из корпусов (освещающий блок) предназначен для размещения лазера, оптической системы для формирования пучка оптического излучения, устройства управления электропитанием, аккумуляторных батарей. Во втором корпусе (приемный блок) размещается оптическая система для приема оптического излучения, Smart-камера, устройство управления режимами работы, устройство хранения информации (дисковый накопитель), устройство синхронизации. Корпуса электрически соединены между собой и с другими устройствами АПК через герметичные разъемы.

МЦГМ входит в состав погружаемого устройства, содержащего:

- металлическую сварную раму;
- МЦГМ;
- блок связи и питания;
- блок управления гидрофизическими датчиками (каналами);
- гидрофизические датчики и каналы измерения проводимости, давления и температуры.

Для обеспечения морских испытаний МЦГМ как нового измерительного датчика (канала) требовались технические средства, обеспечивающие для погружаемого устройства:

- канал связи Ethernet 1Gb с судовым блоком;
- электропитание;
- измерение гидрофизических условий в точке измерения;
- зондирование на глубину до 240 м;

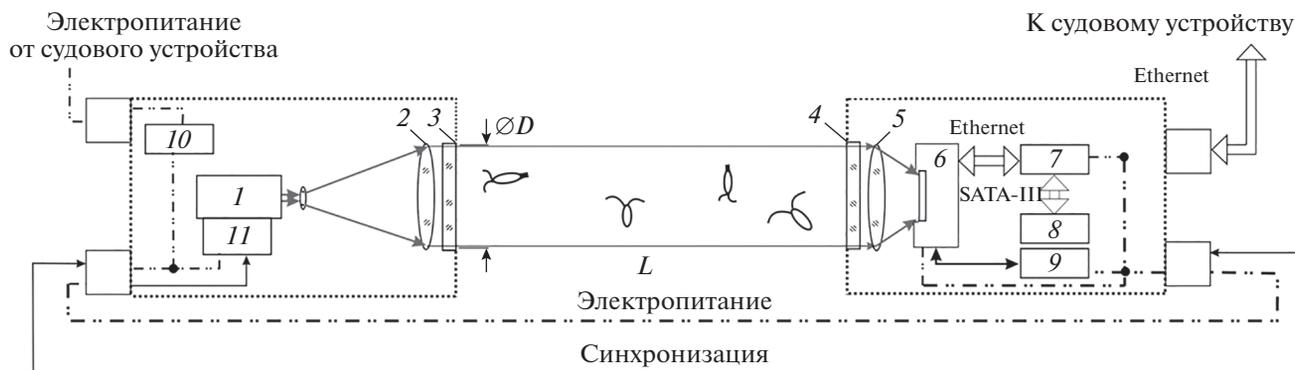


Рис. 3. Функциональная схема МЦГМ. 1 – Лазер, 2 – оптическая система для формирования зондирующего пучка, 3, 4 – иллюминатор, 5 – приемная оптическая система, 6 – Smart камера, 7 – устройство управления погружной частью, 8 – дисковый накопитель, 9 – система синхронизации, 10 – контроллер электропитания погружной части макета, 11 – драйвер управления лазером.

– возможность наблюдения и записи голографических кадров с заданной глубины и в реальном времени разработчиками и специалистами-океанологами.

Ранее в Лаборатории методологии и технических средств океанологических исследований ИО РАН создана измерительно-технологическая платформа (ИТП) для испытаний и отладки новых измерительных каналов (датчиков) [25, 29, 30]. Она пригодна для испытаний МЦГМ после разработки некоторых дополнительных узлов. Кроме того, в ИО РАН на протяжении многих лет последовательно внедряются в практику морских биологических исследований новые средства и методы изучения планктонных и бентосных сообществ (например, работы с упомянутыми выше зондами ТРАП). Исходя из этого, в 2014 г. между ИО РАН и ТГУ было достигнуто соглашение о проведении совместных работ по голографической регистрации зоопланктона применительно к морским экспедициям.

Зимой 2016 г. было принято решение о проведении летних испытаний МЦГМ с помощью ИТП в акватории Карского моря с глубинами до 300 м в 66-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш».

Функциональная схема ИТП в конфигурации для испытаний МЦГМ представлена на рис. 4 (реализован частный случай схемы из [31]). Используются оригинальные рама, судовый блок и блок связи и питания, содержащие двухходовые оптические модемы для организации независимых линий Ethernet: 1Gb и 100Mb. Эти блоки были разработаны и изготовлены совместно с МЦГМ. По линии 1Gb организована прямая связь МЦГМ и ноутбука с программным обеспечением для регистрации голограмм. Гидрофизический модуль ИТП организует сбор данных датчика глубины, STD-зонда, растворенного кислорода. Собранные с измерительных каналов с помощью нормализующих контроллеров, DSL-модемов и витой пары кабель-троса, данные поступают в виде готовой

строки гидрофизических параметров на USB-порт ноутбука. Это позволяет регистрировать голограммы в привязке к гидрофизическим условиям *in situ*. Линия 100 Mb используется для независимой работы с другим экспериментальным измерительным датчиком (каналом) разработки ТГУ – микроволновым датчиком проводимости. Электропитание ИТП организовано от корабельной сети 220 В, 50 Гц, при этом в судовом блоке вырабатывается постоянное питающее напряжение и по линиям питания кабель-троса подается на погружаемое устройство.

Характеристики ИТП:

- кабель-трос: два повива оцинкованных, нагрузка до 2 тонн
2 одномодовых волоконно-оптических линии связи
1 витая пара,
2 линии питания до 200 В, 3 А
- емкость барабана лебедки 350 м (кабель 9.4 мм)
- скорость спуска/подъема 0–45 м/мин
- тяговое усилие 340 кг (на макс. диаметре барабана)
- количество независимых каналов Ethernet 1 Gb 2 шт
- количество каналов RS232 1 шт
- измерение гидрофизических характеристик CTD
- электропитание погружаемого устройства 72 В; 2А
- напряжение питания лебедки и судового блока 220 В, 2.2 кВт
- длина кабеля пульта управления лебедкой 5 м

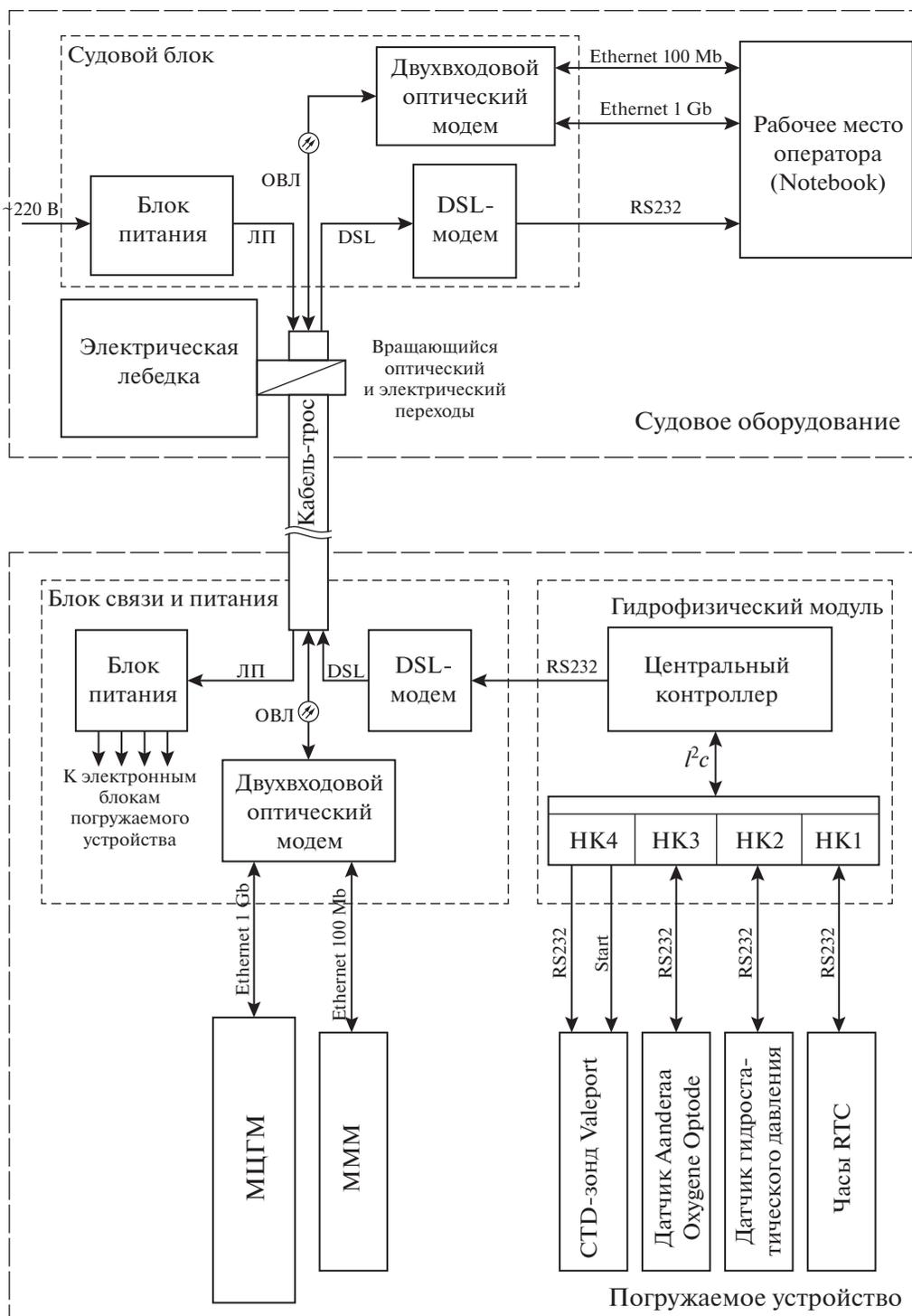


Рис. 4. Функциональная схема измерительно-технологической платформы в 66-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш”. МЦГМ-макет цифрового голографического модуля; МММ – макет микроволнового датчика проводимости; ЛП – линия питания; ОВЛ – оптико-волоконная линия; DSL – витая пара проводов; НК – нормализующий контроллер.

Комплект платформы для испытаний (лебедка, кабель-трос, палубные кабели, погружаемое устройство с МЦГМ, судовой блок, ноутбук с программным обеспечением для регистрации и обработки голограмм) были скомплектованы в

ТГУ и ИО РАН и доставлены в г. Архангельск на борт НИС “Академик Мстислав Келдыш” для монтажа.

Общий вид ИТП на судне показан на рис. 5. Лебедка электрическая приварена к фундаменту

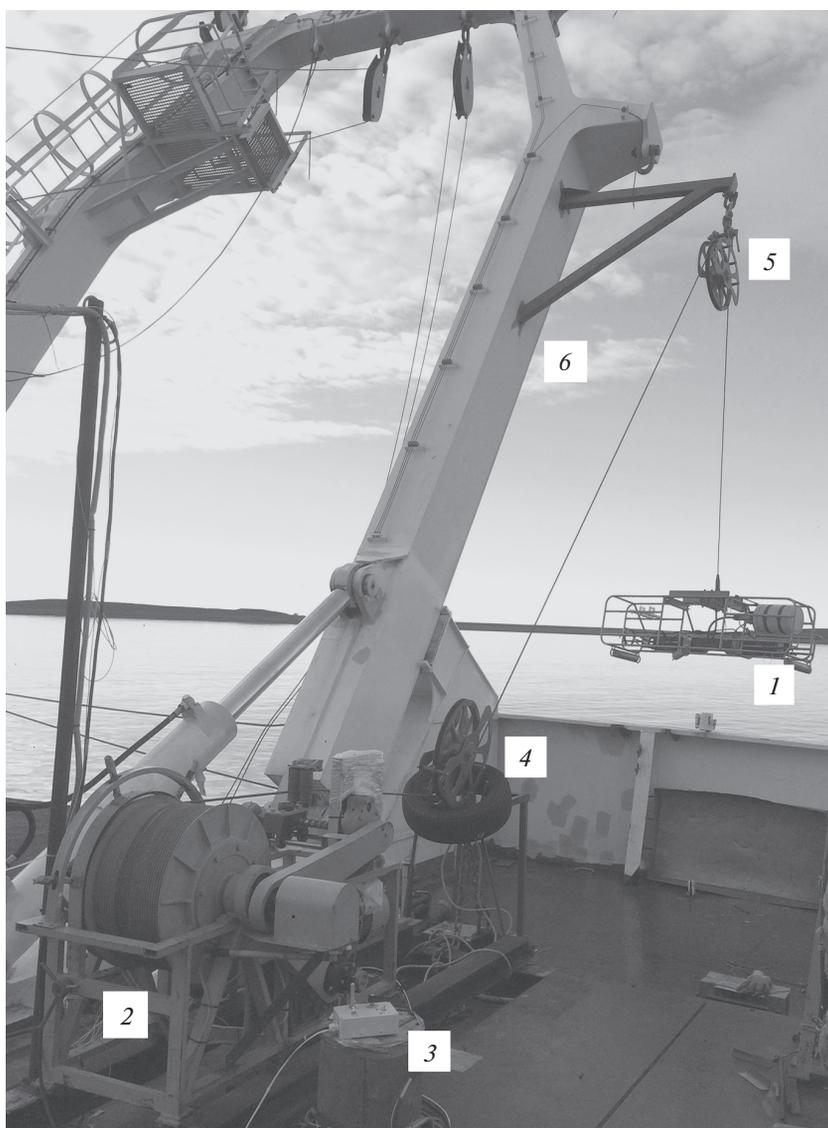


Рис. 5. Измерительно-технологическая платформа на кормовой палубе НИС «Академик Мстислав Келдыш». 1 – Погружаемое устройство с МЦГМ; 2 – лебедка электрическая; 3 – пульт управления лебедкой; 4, 5 – канифас-блоки; 6 – П-рама кормовая.

кормовой палубы по левому борту. Канифас-блоки закреплены за фундамент и боковой кронштейн П-рамы. Судовой блок расположен под навесом около Лаборатории гидролокации, отсюда же подведен фидер питания лебедки и судового блока с ноутбуком.

Общий вид погружаемого устройства показан на рис. 6. На раме, сваренной из титановой трубы, консольно вынесен МЦГМ, по бокам установлены два гидродинамических стабилизатора, ориентирующих его измерительной полостью вперед, в невозмущенный поток. Сзади МЦГМ расположены герметичные корпуса гидрофизического модуля, блока связи и питания, STD-зонд, каналы измерения давления и кислорода. Рама подвешивается

на кабель-тросе через силовую заделку, оптические и электрические линии кабель-троса подключены к блоку связи и питания через гермоввод. Подключение всех остальных кабелей выполнено глубоководными разъемами Birns и ОКБ ОТ РАН. Расчетная рабочая глубина всех герметичных корпусов 1000 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Испытания проводились в акватории Карского моря. Этапы испытаний:

1. Отладка электрической и механических частей ИТП и погружаемого устройства, волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) и МЦГМ.

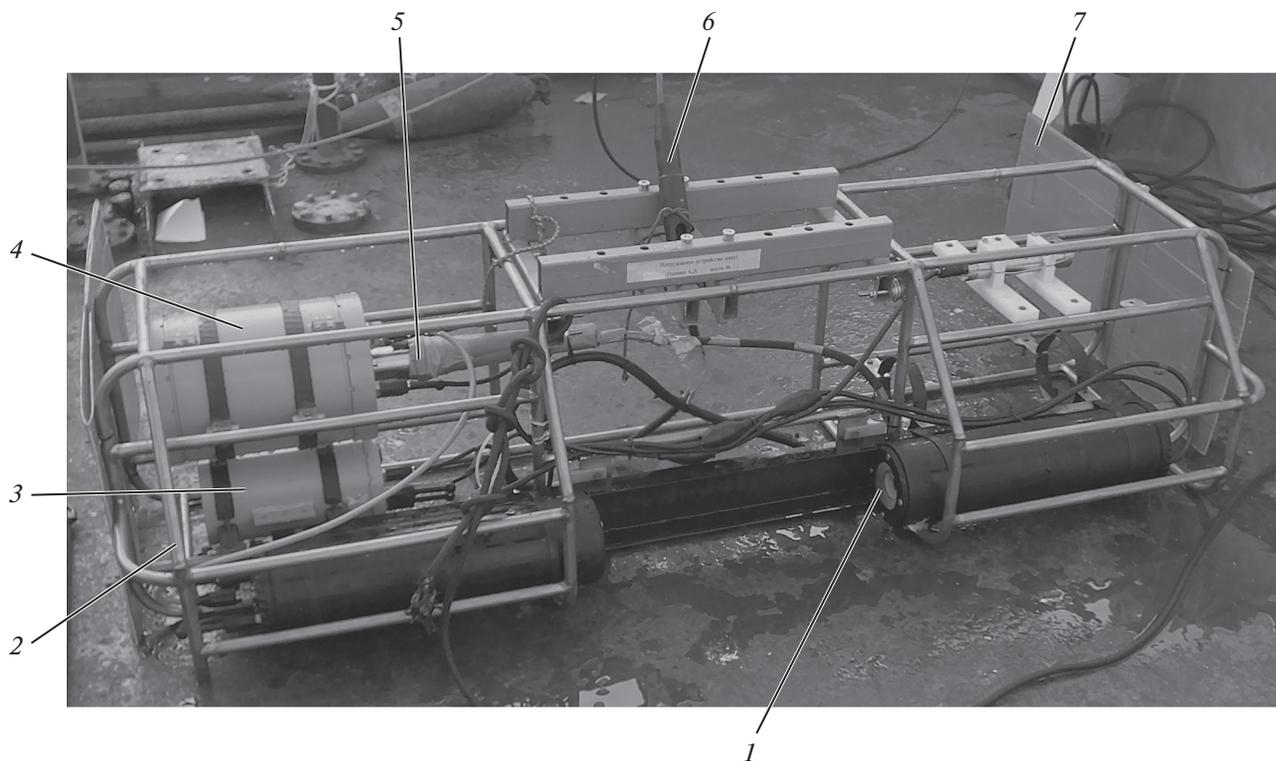


Рис. 6. Погружаемое устройство. 1 – МЦГМ; 2 – рама; 3 – гидрофизический модуль; 4 – блок связи и питания; 5 – гермоввод кабель-троса; 6 – силовая заделка кабель-троса; 7 – стабилизатор гидродинамический.

Работа выполнена во время выхода судна из пролива Карские ворота, перехода к Обской губе и Енисейскому заливу. Первые погружения МЦГМ выполнены в Обской губе, вода в которой имеет пониженную прозрачность. Это осложняло получение голограмм на максимальной измерительной базе МЦГМ 500 мм (продольный размер регистрируемого объема). Кроме того, на судне практически все время работали главные винты, что создавало значительную турбулентность потока там, где находилось погружаемое устройство.

2. Испытательные зондирования.

Выполнялись в районах с преимущественно морской водой, в основной акватории Карского моря и заливах Новой Земли. Особенность работы в рейсе большого НИС – это необходимость выполнения испытания во временные промежутки, строго определяемые последовательностью работ на каждой конкретной станции, так как каждый отряд должен успеть выполнить свои работы и при этом не мешать остальным отрядам.

После выхода судна в точку станции сначала работали отряды в носовой части НИС (на баке), далее по правому борту (планктонные сети и дно-черпатели), затем на корме (геологическая труба и бокс-корер), после этого работала ИТП с МЦГМ.

Перечень успешных зондирований с записью массива голограмм в привязке к гидрофизиче-

ским условиям приведен в таблице. Выполнены зондирования до глубины 240 м с синхронной записью глубины, температуры и электропроводности *in situ*.

В качестве примера на рис. 7 представлен характерный голографический кадр, полученный с помощью модуля МЦГМ *in situ*. На рис. 8. приведен пример реального представления данных комплексного зондирования в реальном времени в виде профилей планктонных концентраций, температуры и проводимости воды. Сопоставление этих результатов позволяет сделать предположение о наличии планктонного слоя на глубине 85–86 м. Резкое увеличение планктонных концентраций, сопровождается скачкообразным изменением гидрофизических параметров (в данном случае температуры и проводимости). Эти корреляционные связи (достаточно хорошо известные в океанологии) косвенно подтверждают достоверность выполненных измерений и оценок.

ВЫВОДЫ

1. Использование измерительно-технологической платформы позволило успешно испытать цифровой голографический модуль.

2. Наглядно продемонстрирована возможность регистрации частиц зоопланктона *in situ* с

Успешные зондирования голографическим модулем (МЦГМ)

Дата	Время	Время станции	Номер станции	Координаты	Глубина максимальная	Глубина погружения
08.08.2016	01:53		5374	74 40.30 с.ш. 59 57.77 в.д.	184	0–112 м 0–116 м 117–0
09.08.2016	16:10	14:40–16:20	5382	74 37.7 с.ш. 59 17.5 в.д.	142	0–85 85–0
09.08.2016	19:53	19:10–20:14	5382	74 35.30 с.ш. 59 24.22 в.д.	116	0–65 85–0
10.08.2016	17:20	8:53–17:20	5386	74 32.59 с.ш. 58 16.61 в.д.	105	0–62
11.08.2016	9:49	8:40–11:52	5389	74 22.75 с.ш. 58 53.79 в.д.	102	0–49 75,35
11.08.2016	21:22	19:05–23:35	5392	76 96.76 с.ш. 60 15.15 в.д.	210	204–0
12.08.2016	20:11	18:50–00:20	5394	72 22.43 с.ш. 75 53.0 в.д.	240	0–101 154–0
13.08.2016	9:30	8:30–9:46	5395	72 31.42 с.ш. 55 31.27 в.д.	34	0–27
13.08.2016	13:10	12:00–14:55	5396	72 32.82 с.ш. 55 30.16 в.д.	44	0–21 31–0

помощью МЦГМ с оперативной визуальной оценкой их размеров, видов и концентрации на разных горизонтах с частотой не менее 1 кадр в сек.

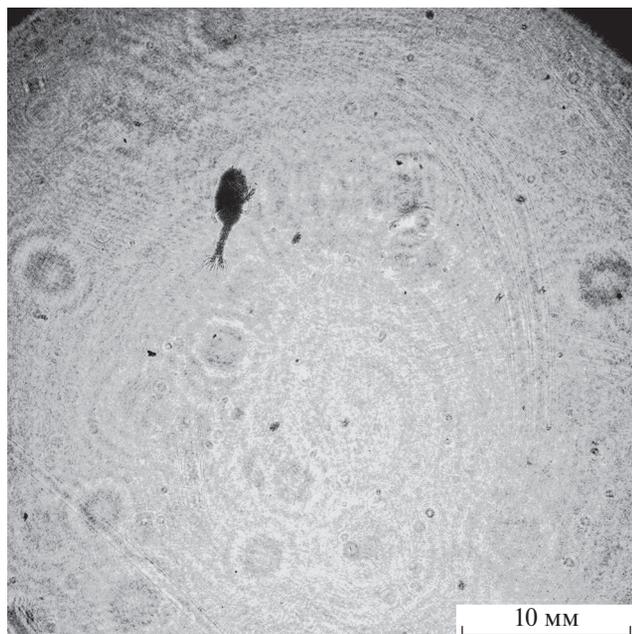


Рис. 7. Голографический кадр, полученный с помощью МЦГМ на глубине 97 м.

3. Получены массивы цифровых голограмм с привязкой к глубине, температуре и электропроводности.

4. Подтверждена работоспособность МЦГМ на глубинах 200 м и более.

5. С целью полного исключения электропомех от судовой сети целесообразно организовать электропитание погружаемого устройства от встроенных аккумуляторов, а для передачи данных использовать только ВОЛС.

Направления дальнейших работ по материалам испытаний.

1. Разработка специализированных вариантов исполнения МЦГМ и его программного обеспечения, обеспечивающих следующие функции:

- определение планктонных концентраций по глубине с объемом усреднения не менее 5–10 л/с,
- классификация планктонных частиц по таксономическим признакам в реальном времени,
- оценка двигательной (поведенческой) активности планктонных частиц.

2. Разработка компоновки МЦГМ, позволяющей реализовать меньшие габариты устройства.

3. Совершенствование информационного блока с целью использования стандартных океанологических информационно-измерительных систем и каналов беспроводной цифровой связи.

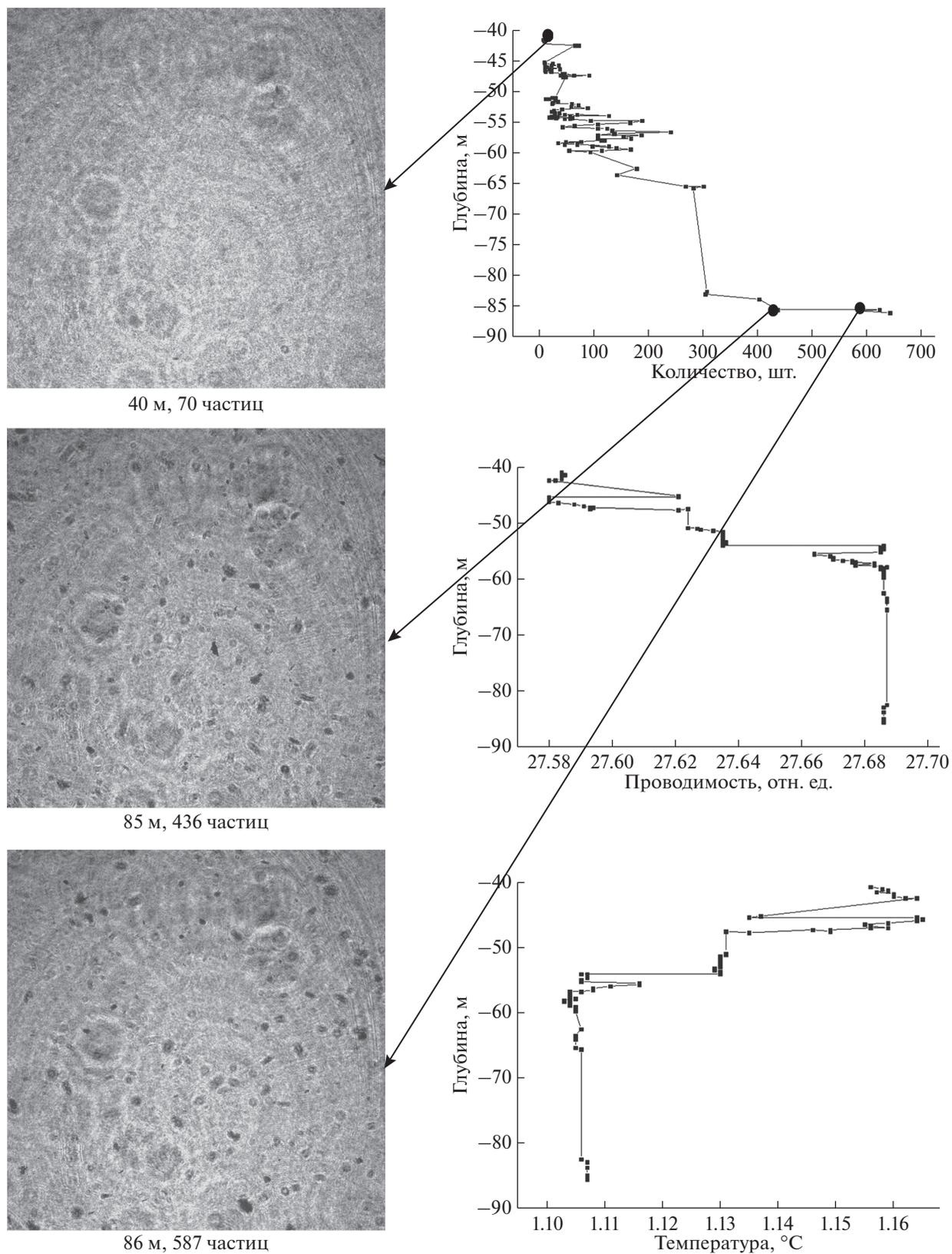


Рис. 8. Пример данных, получаемых при регистрации и обработке цифровых голограмм в реальном времени. Рейс АМК 66, ст. 5382.

Таким образом, испытания в условиях реальной летней морской арктической экспедиции ИО РАН позволили подтвердить правильность заложенных технических решений, сформулировать перечень мероприятий по усовершенствованию цифрового голографического модуля и методики его применения для успешного внедрения в практику океанологических исследований. Кроме того, подтверждено, что применение измерительно-технологической платформы позволяет проводить исследовательскую работу эффективно и автономно, без привязки к штатным судовым лебедкам, в том числе и на судах, не оборудованных такими лебедками.

Авторы благодарят сотрудников ОКБ ОТ РАН В.В. Леденева, С.В. Мардыко, сотрудников ИО РАН инженера–конструктора Е.А. Аистова, инженера–электронщика В.В. Пугачева, инженера–исследователя Я.С. Белевитнева, сотрудника НИ ТГУ н.с. С.В. Зуева.

Обработка результатов и выработка рекомендаций по дальнейшему развитию методов и аппаратуры выполнено в рамках проекта, реализуемого в рамках федеральной целевой программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы”, соглашение о предоставлении субсидии № 14.578.21.0205.

Экспедиция проведена при поддержке средств гранта РФФИ № 14-05-05001 Кар_а Морские комплексные экспедиционные исследования природной среды в местах массовых радиоактивных захоронений у восточного побережья Новой Земли (для оценки возможных последствий накопленных экологических рисков).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Виноградов М.Е. (Ред.)* Современные методы количественной оценки распределения морского планктона М.: Наука, 1983. 279 с.
2. *Демин В.В.* Голографический способ определения показателя преломления частиц дисперсных сред // Патент на изобретение № 2124194. Зарегистр. в Гос. Реестре изобретений РФ 27.12.1998. (Заявка No 94043766 от 13.12.94, G01N21/45).
3. *Демин В.В., Каменев Д.В.* Влияние характеристик камеры, используемой для записи цифровых осевых голограмм частиц, на качество восстановленных изображений // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55. № 11. С. 61–67
4. *Демин В.В., Каменев Д.В.* Критерии качества изображений в цифровой голографии частиц // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 4. С. 17–21.
5. *Демин В.В., Каменев Д.В.* Двумерное представление цифрового голографического изображения объема среды с частицами как способ отображения и обработки информации о частицах // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 7. С. 58–65.
6. *Демин В.В., Каменев Д.В.* Особенности процедуры распознавания планктонных частиц по изображениям, восстановленным с цифровых голограмм // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 10. С. 897–903.
7. *Демин В.В., Каменев Д.В.* Методы обработки и извлечения информации из цифровых голограмм частиц и их практическое применение // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2014. Т. 57. № 8–9. С. 597–607.
8. *Демин В.В., Каменев Д.В.* Апробация алгоритмов автоматического извлечения информации из цифровых голограмм частиц // Изв. вузов. Физика. 2015. Т. 58. № 10. С. 95–101.
9. *Демин В.В., Макаров А.В., Половцев И.Г.* Регистрация планктона с помощью имитатора погружаемой голографической камеры. // Оптика атмосферы и океана. 2006. Т. 19. № 4. С. 312–318.
10. *Демин В.В., Ольшук А.С.* Повышение точности определения координат и достоверности идентификации планктонных частиц путем двухкурсного голографического видео // Изв. вузов. Физика. 2010. № 9/3. С. 38–41.
11. *Демин В.В., Ольшук А.С.* Цифровое голографическое видео для исследования биологических частиц // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 6. С. 42–46.
12. *Демин В.В., Ольшук А.С.* Повышение качества восстановленных голографических изображений путем экстраполяции цифровых голограмм // Изв. вузов. Физика. 2015. Т. 58. № 10. С. 47–53.
13. *Демин В.В., Ольшук А.С., Дзюба Е.В.* Цифровое голографическое видео для исследования динамики планктона // Изв. вузов. Физика. 2010. Т. 53. № 8. С. 81–89.
14. *Демин В.В., Ольшук А.С., Наумова Е.Ю., Мельник Н.Г.* Цифровая голография планктона // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 64. № 12. С. 1089–1095.
15. *Демин В.В., Половцев И.Г., Макаров А.В. и др.* Погружаемая голографическая камера для исследования микрочастиц: проблемы и решения // Оптика атмосферы и океана. 2003. Т. 16. № 9. С. 846–855.
16. *Демин В.В., Половцев И.Г., Симонова Г.В.* Оптические измерения: учеб. пособие: в 2 т. / Под. ред. Самохвалова. И.В. Томск: Издательский Дом ТГУ, 2014. Т. 1. 580 с. С. 496–508
17. *Демин В.В., Степанов С.Г.* Голографические исследования прозрачных микрочастиц // Оптика атмосф. и океана. 1998. Т. 11. № 7. С. 671–676.
18. *Ерофеев П.Н., Рамазин А.Н., Шершнев А.Е., Левашов Д.Е.* Некоторые особенности стратификации вод в юго-западной части Черного моря // Распределение и поведение морского планктона в связи с микроструктурой вод. Киев: Наукова думка, 1977. С. 11–15.
19. *Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л.* Оптическая голография. М.: Мир, 1979. 686 с.
20. *Левашов Д.Е.* К вопросу об оценке биомассы планктона “in situ” при помощи оптического счетчика: Тез. докл. VIII съезда Гидробиол. о-ва РАН.

- Калининград, 16–23 сент. 2001 г. Т. 1. Калининград: АтлантНИРО, 2001. С. 248–249.
21. *Левашов Д.Е.* Техника экспедиционных исследований: Инструментальные методы и технические средства оценки промыслово-значимых факторов среды М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 400 с.
 22. *Левашов Д.Е., Жаворонков А.И.* Современные тенденции в проектировании и оснащении НИС для океанического рыболовства: Тез. докл X Междунар. конф. по промысловой океанологии. Санкт-Петербург, 20–23 мая 1997 г. М.: Изд-во ВНИРО, 1997. С. 76–77.
 23. *Левашов Д.Е., Михейчик П.А., Седов А.Ю. и др.* Лазерный измеритель планктона “ТРАП-7А” для STD-зондов // XII Международная конференция по промысловой океанологии. Калининград: АтлантНИРО, 2002. С. 146–147.
 24. *Нелесо Б.А., Смирнов Г.В., Шадрин А.Б.* Интегрированные системы для гидрофизических исследований. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 238 с.
 25. *Оленин А.Л.* Многоканальный комплекс для разработки новых океанологических измерительных каналов. Автореф. на соиск. учен. ст. канд. технич. наук. М.: ИО РАН, 2012. 25 с.
 26. *Ольшук А.С., Макаров А.В., Мазур В.А.* Цифровая голография для регистрации оседающих частиц в жидкости // Изв. вузов. Физика. 2005. Т 48. № 6. С. 137–138.
 27. *Рябов А.Н., Буланова Н.П., Дёмин В.В. и др.* Судовой оптоэлектронный измеритель планктона. Патент на полезную модель № 131181. Опубликовано: 10.08.2013. Бюл. № 22. Заявка № 2012139685 от 18.09.2012. М. Кл.⁸: G01N 15/14.
 28. *Смирнов Г.В., Еремеев В.Н., Агеев М.Д. и др.* Океанология. Средства и методы океанологических исследований. М.: Наука, 2005. 795 с.
 29. *Смирнов Г.В., Матишов Г.Г., Оленин А.Л. и др.* Морские испытания многоканальной измерительно-технологической платформы // Вестник Южного научного центра. Т. 10. № 3. 2014. С. 54–60
 30. *Смирнов Г.В., Оленин А.Л.* Морские информационно-измерительные системы и новые каналы измерения гидрофизических параметров // Океанология. 2015. Т. 55. № 2. С. 321–325.
 31. *Смирнов Г.В., Оленин А.Л.* Зонд гидролого-оптико-химический. Патент РФ № 2551670 Опубликовано: 27.05.2015 Бюл. № 15. Заявка № 2013138532/28 от 19.08.13. М. Кл. G01V 1/38.
 32. Отчет по составной части ОКР “Разработка и изготовление измерительной оптоэлектронной части экспериментально-технологического макета планктономера”, шифр “Планктономер-ТГУ”. Томский государственный университет (ТГУ). УДК 551.46.083:778.38. № Госрегистрации 01201268769.
 33. *Численко Л.Л.* Номограммы для определения веса водных организмов по размерам и форме тела (морской мезобентос и планктон). Л.: Наука, 1968. 107 с.
 34. *Astthor Gislason, Teresa Silva* Comparison between automated analysis of zooplankton using ZooImage and traditional methodology // J. of Plankton Res. 2009. V. 31. № 12. P. 1505–1516
 35. *Carder K.L., Meyers D.J.* Holography of settling particles: shape parameters // Opt. Eng. 1980. V. 19. № 5. P. 734–738.
 36. *Dominges-Caballero J.A., Loomits N., Li W. et al.* Advanced in plankton imaging using digital holography // in Adaptive Optics: Analysis and Methods; Computational Optical Sensing and Imaging; Digital Holography and Three Dimensional Imaging; and Signal Recovery and Synthesis on CD-ROM (The Optical Society of America, Washington, DC, 2007), presentation number DMB5.
 37. *Dyomin V.V., Kamenev D.V.* Comparison the techniques of finding a best focusing plane of particle image reconstructed from digital hologram // TOM 7 – Optical Systems for the Energy & Production Industries EOS Annual Meeting 2012 (EOSAM 2012), Aberdeen, Scotland, UK, 25–28 September 2012. ISBN 978-3-9815022-4-4.
 38. *Dyomin V.V., Kamenev D.V.* “Investigation of particles located in the water by digital holography”, Proc. SPIE 9771, Practical Holography XXX: Materials and Applications, 97710H (March 7, 2016); <http://dx.doi.org/doi/10.1117/12.2214228>.
 39. *Dyomin V.V., Kamenev D.V.* Information extraction from digital holograms of particles // Proc. ... OCEANS’16 – Shanghai, Shanghai, China, 2016, p. 1–5. doi 10.1109/OCEANSAP.2016.7485674. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7485674&isnumber=748533210.1109/OCEANSAP.2016.7485674>.
 40. *Dyomin V.V., Kamenev D.V., Olshukov A.S.* “Methods for image enhancement and accuracy increase in the digital holography of particles,” OCEANS 2014 – TAIPEI, Taipei, 2014. P. 1–5. doi 10.1109/OCEANS-TAIPEI.2014.6964536 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6964536&isnumber=696428010.1109/OCEANS-TAIPEI.2014.6964536>.
 41. *Victor V. Dyomin, Alexey S. Olshukov.* “Digital Holographic Video of Plankton”, in Applications of Digital Image Processing XXXI, edited by Andrew G. Tescher, Proceedings of SPIE Vol. 7073 (SPIE, Bellingham, WA, 2008). 7 pages. Article CID Number: 7073 2B [7073-92].
 42. *Victor V. Dyomin, Alexey S. Olshukov,* “Technique for Estimation of Quality of the Particles Images Reconstructed from Digital Holograms”, in Adaptive Optics: Analysis and Methods; Computational Optical Sensing and Imaging; Digital Holography and Three-Dimensional Imaging; and Signal Recovery and Synthesis on CD-ROM (The Optical Society of America, Washington, DC, 2007), DTuB2. ISBN 1-55752-838-1.
 43. *Dyomin V.V., Olshukov A.S., Kamenev D.V.* Evaluation of the plankton species coordinates from digital holographic video // Conference Proceedings of the “Oceans’11”, Santander, Spain, 06–09 June 2011. Paper No. 110131-015 (2011). IEEE Catalog Number: CFP11OCF-CDR; ISBN: 978-1-4577-0087-3; ISBN of Paper: 978-1-61284-4577-0088-0/11.
 44. *Dyomin V.V., Polovtsev I.G., Olshukov A.S., Kamenev D.V.* Pilot model of submersible camera for plankton digital holography // T. 7 – Optical Systems for the Energy & Production Industries, EOS Annual Meeting 2012 (EOSAM 2012), Aberdeen, Scotland, UK, 25–28 September 2012.- ISBN 978-3-9815022-4-4.

45. *Dyomin V.V., Watson J., Benzie P.W.* Reducing the Aberrations of Holographic Images of Underwater Particles by Using the Off-axis Scheme with Normal Incidence of Object Beam // Conference Proceedings of the "Oceans'07", Aberdeen, Scotland, 18–21 June 2007. Paper No. 070131-036 (2007). IEEE Catalog Number: 07EX1527C; ISBN: 1-4244-0635-8; Library of Congress: 2006932314.
46. *Foster E., Watson J.* Holography for underwater inspection and measurement: an overview of current work // *Opt. and Laser Technol.* 1997. V. 29. №1. P. 17–23.
47. *Hobson P.R., Krantz E.P., Lampitt R.S. et al.* A preliminary study of the distribution of plankton using hologrammetry // *Opt. and Laser Technol.* 1997. V. 29. № 1. P. 25–33.
48. *Hobson P.R., Watson J.* The principles and practice of holographic recording of plankton // *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 2002. V. 4. P. 34–S49
49. *Katz J., Donaghay P.L., Zhang J. et al.* Submersible holocamera for detection of particle characteristics and motions in the ocean // *Deep-Sea Res.* 1999. V. 1 (46). Part I. P. 1455–1481.
50. *Katz J., Sheng J.* Application of Holography in Fluid Mechanics and Particle Dynamics // *Annu. Rev. Fluid Mechanics.* 2010. V. 42. P. 531–555.
51. *Levashov D.E., Zhavoronkov A.I.* Optronic Sensor for Mezoplankton Studying in the Sea Water // *Proc/OCEAN'95 MTS/IEEE/1995.* V. 1. P. 202–208.
52. *Levashov D.E., Zhavoronkov A.I., Voronkov A.P.* An Optoelectronic Sensor of Mesoplankton as an Addition to CTD-probes and Towed Vehicle // *Proc. OCEANS'98 IEEE/OES.* 1998. V. 1. P. 178–182.
53. *Levashov D.E., Zhavoronkov A.I., Voronkov A.P.* Novel mezoplankton size-quantitative characteristics sensor specially adopted to oceanographic probes and towed vehicles // *Proc. COSU '97.* 1997. V. 2. P. 355–359.
54. *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.
55. *Edwin Malkiel, Jian Sheng, Joseph Katz, J. Rudi Strickler.* The three-dimensional flow field generated by a feeding calanoid copepod measured using digital holography // *J. of Experimental Biology.* 2003. V. 206. P. 3657–3666.
56. *Pfitsch D.W., Malkiel E., Ronzhes Y., King S.R. et al.* Development of a free-drifting submersible digital holographic imaging system // *Proc. MTS/IEEE OCEANS.* 2005. P. 690–696.
57. *Schnars U.* Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques / Schnars U., Jueptner W. Berlin: Springer, 2005. 164 p.
58. *Schnars Ulf, Werner P O J`uptner* Digital recording and numerical reconstruction of holograms // *Meas. Sci. Technol.* 2002. V. 13. P. R85–R101.
59. *Tatsuro Akiba* Submersible Microscopes & Image Processing Technologies Sea Technology March. 1999. P. 61–63.
60. *Watson J.* Underwater visual inspection and measurement using optical holography // *Opt. and Lasers Eng.* 1992. V. 16. P. 375–390.
61. *Watson J., Alexander S., Craig G. et al.* Simultaneous in-line and off-axis subsea holographic recording of plankton and other marine particles // *Meas. Sci. Technol.* 2001. № 12. P. 9–15
62. *Watson J, Alexander S, Hendry D. et al.* Holocam: a sub-sea holographic camera for recording marine organisms and particles *Optical Diagnostics in Engineering* // *Proc. SPIE.* 2000. V. 4076. P. 111–119.

Marine Tests Digital Holographic Module Using the Measurement-Technological Platform

V. V. Dyomin, A. L. Olenin, I. G. Polovcev, D. V. Kamenev, A. S. Kozlova, A. S. Olshukov

The results of marine testing of the digital holographic module for registration and measurements of zooplankton are presented. Tests were performed in the summer of 2016 in the Kara sea with the use of previously developed in IO RAS measuring technological platform. The research vessel "Academician Mstislav Keldysh" was used (66th flight). Sounding were realized up to 240 meters deep with successful recording of about 100 GB of digital holographic frames with reference to depth and electrical conductivity *in situ*. Tests conducted in the conditions of a real summer Arctic sea expedition of IO RAS confirmed the correctness of the technical solutions. According to the results, a list of necessary upgrades of the holographic module for the successful implementation of ocean research into practice is formulated.