

СТАТЬИ

УДК 551.465

**ЦИФРОВАЯ ГОЛОГРАФИЯ И ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ.
ОПЫТ МОРСКИХ РАБОТ**

¹Дёмин В.В., ¹Давыдова А.Ю., ^{1,2}Оленин А.Л., ¹Половцев И.Г., ¹Ольшук А.С.

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск;

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, e-mail: dyomin@mail.tsu.ru, olenin.al@ocean.ru, polovcev_i@mail.ru

Для замены традиционного забора проб сетями с требуемых горизонтов и исключения рутинной ручной лабораторной обработки в разное время созданы различные экспериментальные приборы для автоматизированного исследования планктона *in situ*, но никакие из них не получили широкого признания у океанологов. Ранее нами было показано, что, несмотря на прямые измерения, разделить различные таксономические группы сообщества (например, фитопланктон от зоопланктона) с помощью устройств подобных ТРАП не представляется возможным. Представлены результаты морских измерений с использованием погружаемой цифровой голографической камеры. Работы выполнены летом 2016 г. в акватории Карского моря с помощью измерительно-технологической платформы с борта НИС «Академик Мстислав Келдыш» (66 рейс). Осуществлены зондирования до 240 м с успешной записью около 100 Гб цифровых голографических кадров с привязкой к глубине и гидрофизическим параметрам *in situ*, что составило фактографический материал настоящей работы. Последующая обработка позволила получить морские данные о планктоне Карского моря (получены *in situ* оценочные морские данные реального времени, характеризующие планктонное сообщество акватории Карского моря) и продемонстрировать возможности цифровой голографии для гидробиологии океана. Обсуждаются перспективы применения технологии для оперативных океанографических измерений.

Ключевые слова: зоопланктон, цифровая голография, мониторинг, биопродуктивность, биоразнообразие, биоиндикация

**DIGITAL HOLOGRAPHY AND HYDROBIOLOGICAL MEASUREMENTS.
EXPERIENCE OF MARINE WORKS**

¹Demin V.V., ¹Davydova A.Yu., ^{1,2}Olenin A.L., ¹Polovtsev I.G., ¹Olshukov A.S.

¹National Research Tomsk State University, Tomsk;

²Institute of Oceanology P.P. Shirshov RAS, Moscow, e-mail: dyomin@mail.tsu.ru, olenin.al@ocean.ru, polovcev_i@mail.ru

To replace the traditional sampling by networks from the required horizons and to exclude routine manual laboratory processing, various experimental devices for automated *in situ* plankton research were created at different times, but none of them were widely recognized by oceanologists. We previously showed that, despite direct measurements, it is not possible to separate various taxonomic groups of the community (for example, phytoplankton from zooplankton) using devices like TRAP. The results of marine measurements using an immersion digital holographic camera are presented. Registration works were performed in the summer of 2016 in the Kara Sea using the measuring and technological platform from the board of the R / V «Akademik Mstislav Keldysh». Soundings of up to 240 meters were carried out with the successful recording of about 100 GB of digital holographic frames with reference to depth and hydrophysical parameters *in situ*, which constituted the factographic material of the present work. Subsequent processing made it possible to obtain marine data on the plankton of the Kara Sea (real-time estimated marine data obtained *in situ* characterizing the planktonic community of the Kara Sea) and demonstrate the capabilities of digital holography for ocean hydrobiology. The prospects of applying the technology for operational oceanographic measurements are discussed.

Keywords: zooplankton, digital holography, monitoring, bio productivity, biodiversity, bioindication

Для замены традиционного забора проб сетями с требуемых горизонтов и исключения рутинной ручной лабораторной обработки в разное время созданы различные экспериментальные приборы для автоматизированного исследования планктона *in situ*, но никакие из них не получили широкого признания у океанологов. Следует отметить серию гидробиологических измерителей ТРАП разработки ВНИРО [1, 2]. Однако, несмотря на прямые измерения, разделить различные таксономические группы сообще-

ства (например, отделить фитопланктон от зоопланктона) с помощью устройств подобных ТРАП не представляется возможным.

Основные задачи гидробиологических измерений планктона можно сформулировать в виде задач «ЗБ мониторинга»:

– мониторинг (в том числе подспутниковый) биопродуктивности с целью оценки кормовой базы,

– определение динамики развития водоемов посредством мониторинга видового биоразнообразия планктона,

– мониторинг экологической обстановки в водных акваториях с целью предупреждения экологических катастроф посредством биоиндикации.

Здесь понятие «мониторинг» является принципиально важным, поскольку именно постоянное измерение позволяет сделать эти измерения информативными.

Материалы и методы исследования

В Лаборатории радиофизических и оптических методов изучения окружающей среды Национального исследовательского Томского государственного университета (ТГУ) с 2000 г. ведутся работы по разработке методов и созданию цифровых голографических камер для регистрации частиц. Цифровая голографическая камера (DHC – Digital Holographic Camera) для исследования частиц в среде обитания (*in situ*) может стать основой для создания средств измерения – датчиков (сенсоров) морских планктонных частиц, выполняющих функции ЗБ-мониторинга [3–6]. При этом большое значение имеет как техническая реализация самой погружной камеры, так и проблемно ориентированное программное обеспечение DHC-технологии, увязанное с временными процессами объекта измерений, скоростью обмена и передачи информации. Подробнее об использовании цифровой голографии для

исследования частиц в воде можно ознакомиться в [7–11].

В 2016 г. в рамках экспедиции ИО РАН был испытан с борта НИС «Академик Мстислав Келдыш» (66 рейс) аппаратно-программный комплекс (АПК), включающий DHC и другие сенсоры, а также разработанную в ИО РАН систему доставки сенсоров в исследуемый горизонт и передачи информации на борт судна.

Общий вид погружаемого устройства с голографическим модулем линейной компоновки показан на рис. 1. Основные его части – это расположенные в двух прочных глубоководных корпусах с иллюминаторами и разъемами лазерный освещающий блок и регистрирующий блок со смарт-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 (регистрирующий блок) размещается оптическая система для приёма оптического излучения, смарт-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.

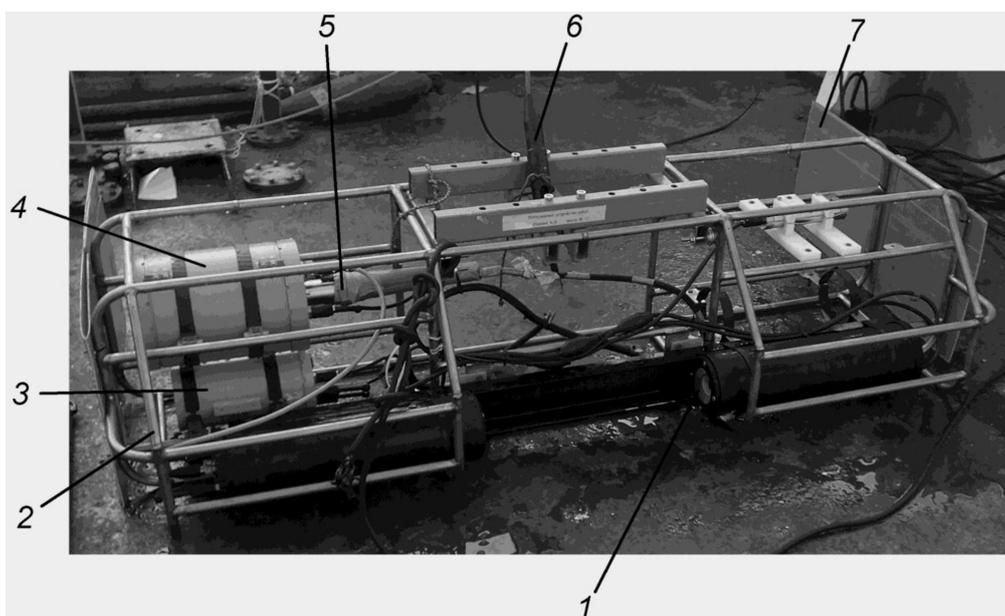


Рис. 1. Общий вид погружаемого устройства с DHC (1 – DHC; 2 – рама; 3 – гидрофизический модуль; 4 – блок связи и питания; 5 – гермоввод кабель-троса; 6 – силовая заделка кабель-троса; 7 – стабилизатор гидродинамический)

Для обеспечения измерений использована измерительно-технологическая платформа (ИТП) разработки ИО РАН [12], обеспечивающая для погружаемого устройства зондирование на глубину до 300 м, канал связи Ethernet 1Gb с судовым блоком, электропитание, измерение гидрофизических условий в точке измерения, возможность наблюдения и записи голографических кадров с заданной глубины и в реальном времени. По линии 1Gb организована прямая связь АПК и судового ноутбука с программным обеспечением для регистрации голограмм. Гидрофизический модуль ИТП организует сбор данных датчиков глубины, давления и проводимости, кроме того, регистрируется электропроводность морской воды другим экспериментальным измерительным датчиком разработки ТГУ – микроволновым датчиком. Таким образом, регистрируются голограммы в привязке к гидрофизическим условиям *in situ*. Электропитание ИТП организовано от корабельной сети 220 В, 50 Гц. На раме, сваренной из титановой трубы, консольно вынесен модуль ДНС. За ним расположены герметичные корпуса гидрофизического модуля, блока связи и питания, датчики давления, температуры и проводимости. Рама подвешивается на кабельтросе 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. Расчетная рабочая глубина всех герметичных корпусов 600 м.

Результаты исследования и их обсуждение

Карта района работ представлена на рис. 2, красными точками показаны наиболее информативные места исследования.

В экспедиции были зарегистрированы более 300 голограмм (взяты голографические пробы) в различных географических координатах в различные моменты времени. Голограммы были обработаны в лабораторных условиях с использованием программного обеспечения, основанного на DNS-технологии.

Ниже представлены результаты этой обработки, показывающие возможности подводной цифровой голографии для гидробиологических исследований в разрезе задач ЗБ мониторинга.

Мониторинг биопродуктивности. Информативной составляющей являются интегральные характеристики планктонных распределений, а именно зависимость биомассы, среднего размер частиц и планктонных концентраций от координаты. Это важно при изучении пищевых цепочек, когда исследуется вопрос о биопродуктивности или кормовой базе в аквакультуре, рыбоводстве или рыболовстве.



а)



б)

Рис. 2. а) Карта морских работ с использованием АПК, проведенных в составе 66 Арктической экспедиции ИО РАН на НИС «Академик Мстислав Келдыш». Красными точками отмечены места регистрации голографических проб; б) АПК на корме НИС «Академик Мстислав Келдыш»:

1 – погружаемый АПК с камерой ДНС, 2 – электрическая лебедка ВОЛС, 3 – кормовая П-рама, 4 и 5 – канифас блоки, 6 – панель управления лебедки

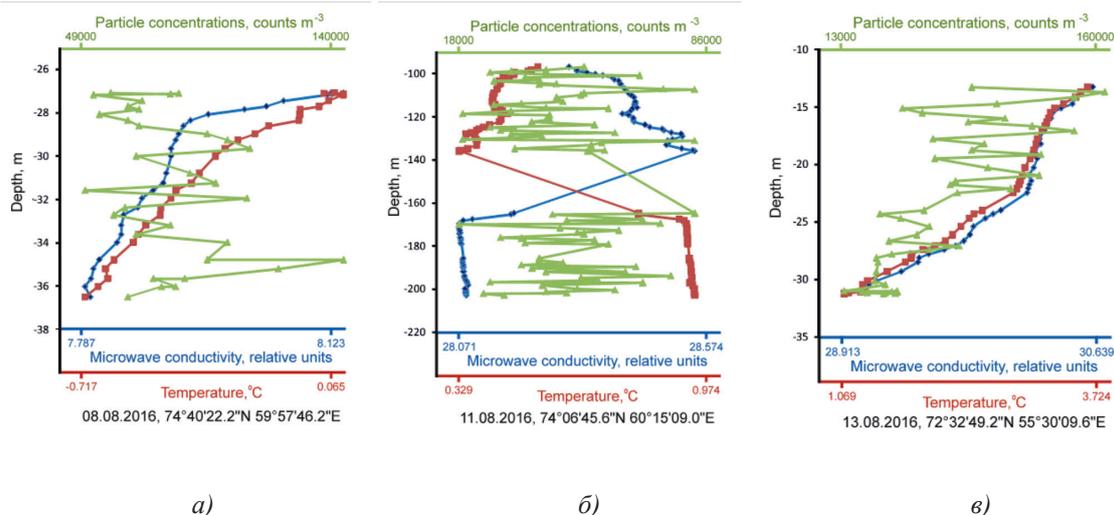


Рис. 3. Профили концентрации планктона (зеленая линия), микроволновой проводимости (синяя линия) и температуры (красная линия) по глубине, зарегистрированные 8 августа 2016 (а), 11 августа 2016 (б) и 13 августа 2016 (в) в акватории Карского моря около Новой Земли

Во время погружения и поднятия ДНС камеры регистрируются видеопоследовательности голограмм и измеряются гидрофизические параметры воды – проводимость и температура. Зарегистрированные цифровые голограммы и измеренные параметры передаются на судовой компьютер для последующей обработки и восстановления голографических изображений планктонных частиц. Обработанные данные по планктону позволяют пересчитать частицы и отобразить информацию в виде пространственно-временных распределений интегральных параметров.

На рис. 3 приведены результаты обработки голографических проб по ДНС технологии, демонстрирующие возможности для решения практических задач, связанных с измерением пространственного распределения планктона с целью оценки кормовой базы в совокупности с данными по гидрофизике (в том числе и для подспутниковой калибровки).

Здесь представлены профили концентрации частиц, температуры и микроволновой проводимости по глубине в акватории Карского моря около Новой Земли для трех стационарных стоянок, разное время (координаты стационарных стоянок корабля: (а) 74°40'22.2"N 59°57'46.2"E, (б) 74°06'45.6"N 60°15'09.0"E, (с) 72°32'49.2"N 55°30'09.6"E). Надежность данных, полученных для концентраций частиц, подтверждается сравнением с данными по гидрофизическим параметрам воды. Коэффициент корреляции голографических

данных и гидрофизических измерений составил 73% по проводимости и 75% по температуре. Это является достаточно хорошим соответствием и свидетельствует о достоверности измеренной информации.

Для оперативных измерений оценим τ_p^{bp} – время получения одного отсчета при мониторинге пространственных распределений интегральных характеристик планктона (мониторинг биопродуктивности). Примем, в качестве исходных данных:

- скорость судовой лебедки 1 м/с (скорость сканирования пространства),
- объем воды, необходимый для формирования 1 отсчета – 10 л/с (для устройств ТРАП имеет место 2–7 л/с),
- объем воды, регистрируемый за одну экспозицию – 1 л (для ДНС).

Тогда необходимое время получения одного отсчета (одной экспозиции) $\tau_p^{bp} = 0,1$ с, а одна точка графика формируется усреднением измерений по десяти таким отсчетам (экспозициям), сделанных на 1 м профиля по глубине (для краткости в дальнейшем будем говорить, что размер одного пикселя профиля по глубине составит $l_{\text{пикс}}^{bp} = 1$ м).

Заметим, что при уменьшении $l_{\text{пикс}}^{bp}$ уменьшится репрезентативность выборки. А в рассматриваемом случае мониторинга биопродуктивности необходимо, чтобы планктонные особи, составляющие выборку (зарегистрированные в пробе), были различными (из неперекрывающихся объемов) в каждом отсчете (кадре). Поэтому размер пикселя профиля по глубине – 1 м представляется наиболее целесообразным.

Мониторинг видового биоразнообразия планктона. Информативной составляющей для этого вида мониторинга является относительное содержание особей различного вида в анализируемом планктонном сообществе, выраженное в виде относительных концентраций или относительных биомасс, т.е. для мониторинга биоразнообразия необходимо в режиме реального времени выполнять классификацию планктона. Это важно при оценке перспектив развития водоема с различными целями: изучение биоразнообразия акватории, оценка биопродуктивности, определение качества воды, экологический мониторинг воздействия антропогенных факторов на акваторию. Отметим, что экологический мониторинг водных объектов предусмотрен законодательством РФ [13, 14].

В настоящей работе реализован предложенный нами ранее алгоритм [4] быстрой классификации планктона до уровня отрядов. На рис. 4 представлено фото, которое иллюстрирует работу алгоритма ДНС по обработке данных одной планктонной пробы с представлением результатов классификации по размерным группам в виде гистограммы.

Для успешной работы алгоритма классификации планктона до уровня отрядов необходима предварительно подготовленная база данных по планктону данной акватории. Для Карского моря на основе

обработанных голограмм была сформирована такая база. Время, затраченное на обработку 300 голограмм для создания такой базы, считая восстановление голографических изображений планктонных частиц, обработку и собственно классификацию, составило ~1,5 ч работы стационарного компьютера.

В качестве одного из таксономических признаков в предлагаемом алгоритме быстрой автоматической классификации используется морфологический параметр, а морские частицы размером более 200 мкм делятся на 7 таксономических групп: *Appendicularia*, *Copepoda*, *Cladocera*, *Rotifera*, колонии и цепочки фитопланктона, другие. Достоверность данных, полученных ДНС-классификацией, подтверждается сравнением с результатами «ручной классификации», выполненной оператором. Правильность классификации составляет 73%. Следует также отметить возможность отделения фитоорганизмов от зоопланктона. Результаты обработки данных для трех станций на карте морских работ вблизи Новой Земли (место выполнения работ на рис 2, а, обведено кругом) приведены на рис. 5. На пяти других станциях концентрации планктона оказались недостаточными для репрезентативного анализа. Здесь представляется интересным неожиданно большое содержание аппендикулярии в планктонных пробах в сравнении с известными данными [15].

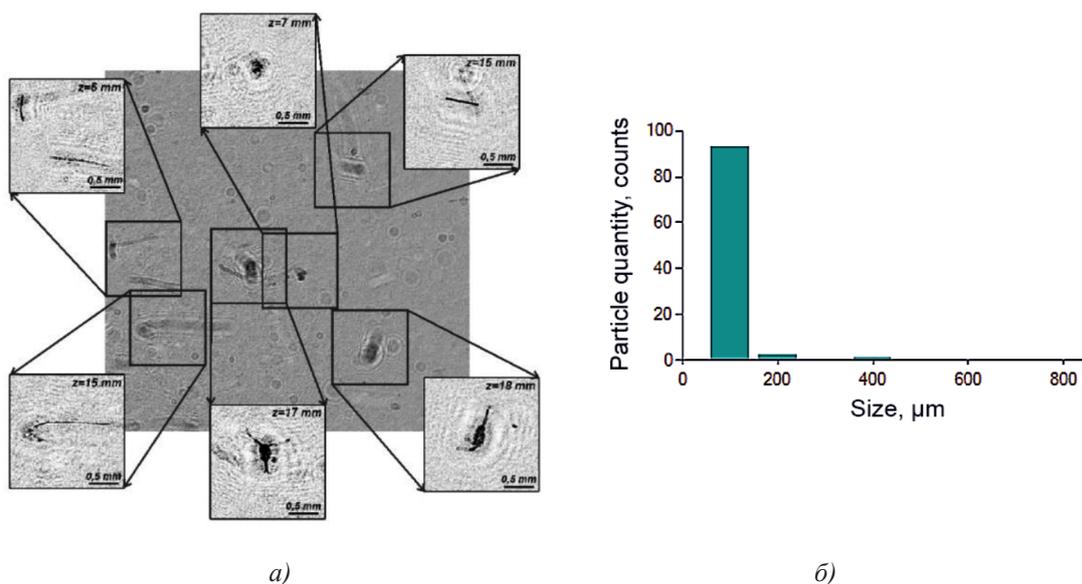


Рис. 4. (а) Цифровая голограмма и восстановленные изображения планктонных частиц, (б) гистограмма распределения планктонных частиц по размерам, зарегистрированная на глубине – 22,12 м в ходе экспедиции в Карском море 13 августа 2016 г. на станции с координатами 72°32'49.2" N, 55°30'09.6" E

Для оценки получения одного отсчета (необходимого для обеспечения мониторинга биоразнообразия планктона, а также для биондикации) примем, что, в отличие от мониторинга биопродуктивности, биоразнообразие является достаточно стационарной величиной, поскольку относительные концентрации планктона обычно могут меняться в течение суток под действием гидрофизических факторов, связанных, например, с приливами и отливами. Иные факторы, влияющие на планктон, имеют заведомо большие длительности, значит, суточный цикл является среди них минимальным по длительности. Поэтому уместно принять максимальное время на получение одного результата по планктонной классификации в одной точке пространства за ~30 мин, для суточного мониторинга достаточно такие отсчеты выполнять через 2 ч, т.е. за сутки получается 10–12 отсчетов. Здесь же следует отметить, что, в отличие от предыдущей задачи, мониторинг биоразнообразия нет смысла выполнять в режиме сканирования пространства, поскольку, ввиду подвижности планктонных особей, достаточно использовать стационарные стоянки прибора, определенные в местах максимальной концентрации планктона, например по результатам изучения с использованием вышеописанной методики мониторинга биопродуктивности.

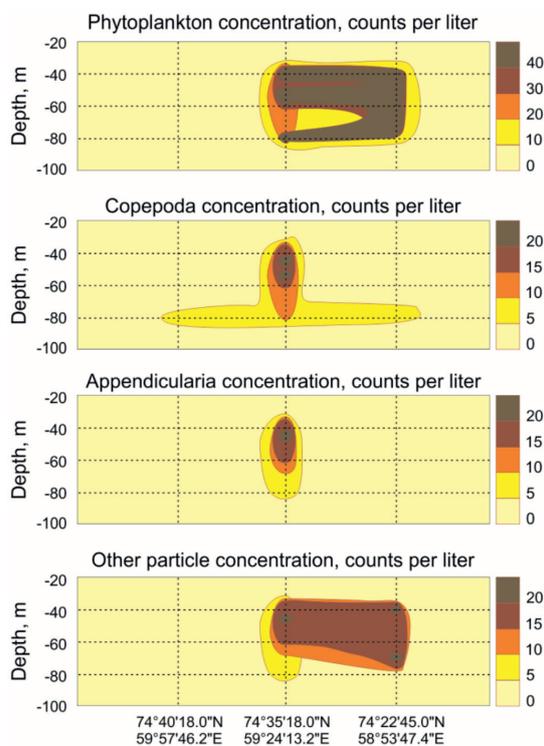


Рис. 5. Карты планктонных концентраций с классификацией по отрядам основных групп планктона

Оценим требуемую производительность канала связи с судном (или береговой станцией). Объем одной цифровой голограммы можно оценить в 1 Гб, поэтому для решения вычислительной задачи на борту судна необходим высокопроизводительный канал связи 10 Гб в с (см. оценки по $\tau_p^{(in)}$), достижимый только в технологии ВОЛС. Если вычислительную задачу по цифровой голографии планктона решать на борту погружаемого устройства, то возможно использование традиционных низкоскоростных каналов связи, подобных используемым на STD-зондах. Это, в сочетании с положительными результатами, полученными по материалам экспедиции, дает основание ставить вопрос о необходимости разработки малогабаритной сетевой версии цифрового голографического датчика планктона с применением спецпроцессоров, реализующих технологию ДНС.

Выводы

1. В ходе морских работ и последующей обработки наглядно продемонстрированы возможности цифровой голографии для гидробиологии океана в задачах ЗБ мониторинга.

2. Использование измерительно-технологической платформы позволило обеспечить эффективный и производительный канал связи для цифровой голографической камеры (ДНС).

3. Получены *in situ* оценочные морские данные реального времени, характеризующие планктонное сообщество акватории Карского моря.

4. Определены технические характеристики цифровых голографических аппаратно-программных комплексов для гидробиологического ЗБ мониторинга.

Исследование выполнено при поддержке программы «Повышение конкурентоспособности Томского государственного университета» в рамках фонда Д.И. Менделеева.

Авторы выражают глубокую благодарность руководителю экспедиции, зам. директора ИО РАН М.В. Флинту за постоянное внимание к исследованиям и полезные обсуждения результатов.

Список литературы

1. Левашов Д.Е. Техника экспедиционных исследований: Инструментальные методы и технические средства оценки промысловых значимых факторов среды. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 400 с.
2. Levashov D.E., Mikheyich P.A., Sedov A.Yu., Kantakov G.A., Voronkov A.P. Laser plankton meter TRAP-7A, a new sensor for CTD probing. *Sea Technology*. 2004. V. 45 (2). P. 61–65.
3. Дёмин В.В., Оленин А.Л., Половцев И.Г., Камнев Д.В., Козлова А.С., Олышук А.С. Морские испытания

цифрового голографического модуля с использованием измерительно-технологической платформы // Океанология. 2018. Т. 58. № 5 С. 817–828.

4. Дёмин В.В., Половцев И.Г., Давыдова А.Ю. Физические основы метода определения геометрических характеристик и распознавания частиц в цифровой голографии // Известия высших учебных заведений. Физика. 2017. Т. 60. № 11. С. 174–176.

5. Dyomin V.V., Olshukov A.S., Davydova A.Y. Data acquisition from digital holograms of particles. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2018. Vol. 10677. P. 106773B-1-106773B-11.

6. Dyomin V., Polovtsev I., Olshukov A., Davydova A. DHC Sensor – A Tool for Monitoring the Plankton Biodiversity in a Habitat. In 2018 OCEANS – MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO) (pp. 1–5). IEEE. (2018).

7. Bochdansky A.B., Jericho M.H., Herndl G.J. Development and deployment of a point-source digital inlineholographic microscope for the study of plankton and particles to a depth of 6000 m in Limnol. Oceanogr.: Methods 11, 28–40 (2013).

8. 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.

9. Liu Z., Watson J., Allen A. Efficient image preprocessing of digital holograms of marine plankton. IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2017. Vol. 43(1). P. 83–92.

10. Rotermund L.M., Samson J., Kreuzer H.J. A Submersible Holographic Microscope for 4-D In-Situ Studies of Micro-Organisms in the Ocean with Intensity and Quantitative Phase Imaging. J. Marine. Sci. Res. Dev. 2016. Vol. 6(1). P. 181.

11. Tan S., Wang S. An approach for sensing marine plankton using digital holographic imaging. Optik International Journal for Light and Electron Optics. 2013. Vol. 124. P. 6611–6614.

12. Смирнов Г.В., Матишов Г.Г., Оленин А.Л., Аистов Е.А., Григоренко К.С., Степаньян О.В. Морские испытания многоканальной измерительно-технологической платформы // Вестник южного научного центра. 2014. Т. 10. № 3. С. 54–60.

13. Водный кодекс РФ от 03.06.2006 № 74-ФЗ (ред. от 02.08.2019) [Электронный ресурс]. URL: <http://base.garant.ru/12147594/> (дата обращения: 30.10.2019).

14. Федеральный закон «Об охране окружающей среды» от 10.01.2002 № 7-ФЗ (ред. от 27.12.2018) [Электронный ресурс]. URL: <http://base.garant.ru/12125350/> (дата обращения: 30.10.2019).

15. Matishov G., Makarevich P., Timofeev S., et al. Biological Atlas of the Arctic Seas 2000: Plankton of the Barents and Kara Seas. International Ocean Atlas Series. 2000. Vol. 2.