

УДК 551.46.07

## РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ КОМПЛЕКСНЫХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ПОДВОДНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЭКОСИСТЕМАМ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

© 2019 г. Н. А. Римский-Корсаков\*, М. В. Флинт, С. Г. Поярков, И. М. Анисимов, Я. И. Белевитнев, А. А. Пронин, С. Н. Тронза

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия  
e-mail: nrk@ocean.ru*

Поступила в редакцию 30.01.2019 г.

После доработки 30.01.2019 г.

Принята к публикации 05.02.2019 г.

В статье затронуты методические проблемы подводных исследований фауны, растений, микро- и мезорельефа, придонной области морей Российской Арктики в связи с изучением региональных экосистем. Рассмотрены методы и технические средства подводных наблюдений, используемые в арктических экспедициях Института океанологии. Предложены технические решения, повышающие эффективность гидролокационного и визуального обследования поверхности дна. Приведены результаты экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** подводные исследования, фауна, растения, микро- и мезорельеф, моря Российской Арктики

**DOI:** 10.31857/S0030-1574594679-683

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН) ведет систематическую экспедиционную работу в Российской Арктике [4–6], направленную на изучение региональных экосистем. Существенную часть таких исследований составляют инструментальные бесконтактные наблюдения донной фауны, растений, микро- и мезорельефа, осуществляемые с борта необитаемых подводных аппаратов (НПА). При этом применяются инструментальные методы: гидролокация бокового обзора и акустическое профилирование, подводное телевидение, гамма-спектрометрия и гидрофизическое зондирование [1].

Для мезомасштабной поисковой съемки в арктических экспедициях ИО РАН используется буксируемый гидролокатор бокового обзора (ГБО) «Мезоскан» с глубиной погружения 2 км разработки ИО РАН [1–3]. Рабочая частота гидролокатора составляет 78 кГц, максимальная полоса обзора 1200 м, разрешающая способность 1.0–0.2 м. Сбор, отображение, обработка и архивирование гидролокационной информации осуществляется с помощью оригинальных программ для реального времени и для режима постобработки (ЭхоГраф и ВинРастр).

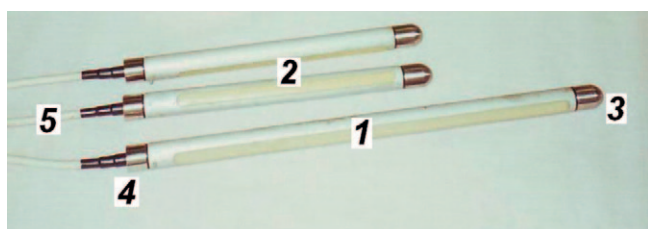
Для детальных исследований морфологии рельефа дна и конфигурации подводных объектов, в том числе на мелководье, с борта маломерных плавсредств применяется буксируемый ГБО YellowFin канадской фирмы Imagenex с рабочей глубиной до 300 м и рабочими частотами 250, 300 и 600 кГц.

Наиболее информативным методом наблюдений морских животных и растений, микрорельефа и техногенных подводных объектов является их видеосъемка. Такие наблюдения могут производиться на маршрутах исследования в процессе погружения буксируемых, автономных и телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов — БНПА, АНПА и ТНПА. Последние достижения в области светоэлектронных преобразователей, оптоволоконных технологий и светодиодных матриц позволяют получать подводные видеоизображения высочайшего качества по разрешению и цветопередаче.

Для маршрутных глубоководных видеонаблюдений поверхности дна, донных животных и растений в ИО РАН разработан БНПА «Видеомодуль», который начиная с 2015 года, совершенствуясь, эксплуатируется в Арктических



**Рис. 1.** Буксируемый необитаемый подводный аппарат «Видеомодуль» в процессе спуска за борт научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш».



**Рис. 2.** Антенны ГБО разработки Лаборатории гидролокации дна ИО РАН с рабочей частотой 240 кГц: 1 — универсальная приемоизлучающая; 2 — приемные для интерферометра; 3, 4 — узлы крепления с акустической развязкой; 5 — подводный кабель СМПЭВГ.

экспедициях. Аппарат представляет собой пространственную раму из нержавеющей стали, внутри которой на кронштейнах закреплены прочные корпуса с электронным оборудованием. Рама имеет узел регулируемой подвески БНПА к буксирному кабель-тросу и 12 грузов массой по 25 кг для его устойчивого заглубления и балансировки по дифференту. На раме установлены видеокамеры, светодиодные источники заливающего света, лазерные масштабирующие маркеры, глубомер, боксы с элементами питания. Как опция устанавливаются гидрофизический зонд SBE и подводный гамма-спектрометр РЭМ-26. Фотография аппарата приведена на рис. 1, подробное описание и технические характеристики — в работе [1].

В 2015–20 годах с помощью БНПА «Видеомодуль» были получены видеоизображения поверхности дна, изображения донной флоры и фауны шельфа морей Сибирской Арктики,

а также в заливах Новой Земли Карского моря и в Новоземельской впадине. Опыт эксплуатации БНПА «Видеомодуль» показал его высокую эффективность при исследовании придонного слоя гидросферы.

Однако в ряде случаев в процессе наблюдений поверхности дна возникали трудности при интерпретации полученных видеоизображений, связанные с тем, что видеосистемы позволяют регистрировать микромасштабные (менее метра) объекты и явления вне их морфологической связи с мезомасштабными (до сотни метров) элементами донного рельефа и подводными объектами. Решить проблему возможно путем использования синхронной панорамной съемки поверхности дна с помощью гидролокатора кругового или бокового обзора (ГКО/ГБО). ГКО традиционно используются на ТНПА, поскольку эти аппараты имеют возможность стабилизировать свое положение относительно поверхности дна и подводных объектов и обеспечить тем самым повторяемость изображения окружающего пространства, получаемых с помощью ГКО. Другое дело — ГБО. Сам принцип получения изображений с его помощью предусматривает движение носителя — как правило БНПА — по прямолинейному маршруту на значительном (более 10 метров) расстоянии от дна. Таким образом, логичным решением по расширению возможностей БНПА «Видеомодуль» стало оборудование последнего ГБО с использованием современной технологии генерации и обработки частотно-модулированных сигналов («chirp»), позволяющей на порядок повысить разрешающую способность гидролокатора и обеспечить съемку на малых дистанциях. Параметры ГБО БНПА «Видеомодуль» (ГБО-ВМ) были выбраны исходя из следующих условий: синхронная работа с видеосистемами, оптоволоконная линия для передачи данных, расстояние до дна при буксировке — 1–5 м, полоса обзора — до 200 м, малое энергопотребление, разрешающая способность, позволяющая судить о характере микрорельефа.

Для ГБО-ВМ были использованы стандартные глубоководные гидроакустические антенны (ГА) разработки Лаборатории гидролокации дна ИО РАН (рис. 2) с рабочей частотой 240 кГц и раскрывом характеристики направленности ( $1^\circ \times 60^\circ$ ) [2]. Антенны были установлены в нижней части кормы аппарата с левого и правого бортов.

Подводная электронная часть ГБО-ВМ размещалась в отдельном прочном корпусе, установленном на раме БНПА, и включала три основных блока, реализованных в виде печатных плат. Функциональная схема подводной электронной части приведена на рис. 3. Работой подводной части ГБО-ВМ управляет блок цифровой обработки сигналов. С его помощью осуществляется формирование и генерация зондирующих линейно частотно-модулированных (ЛЧМ) сигналов, оцифровка принимаемых эхосигналов и их корреляционная обработка (согласованная фильтрация) с последующей передачей в бортовую систему телеметрии БНПА по интерфейсу Ethernet для дальнейшей трансляции результатов в судовую часть комплекса. В блоке усилителя мощности сформированный ЛЧМ сигнал раскачивается до напряжения амплитудой порядка нескольких сотен вольт. Этот сигнал поступает на ГА, преобразуется им в акустический и излучается в сторону дна. Принятые ГА эхо-сигналы от дна и подводных объектов усиливаются (блок приемного усилителя) до уровня, необходимого для последующей оцифровки.

Собственно судовая часть ГБО-ВМ представляет собой ПЭВМ и программное обеспечение для обработки, сбора и отображения гидролокационной информации, которая поступает из судовой части системы ТМ БНПА. Обработка эхосигнала заключается во временной коррекции эхосигнала (ВАРУ) с целью выравнивания амплитуд («яркости») сигналов, отраженных от объектов, расположенных вблизи и вдали от антенн ГБО. Далее информация построчно отображается на экране ПЭВМ в виде движущегося окна и записывается в файл. Отличие ГБО-ВМ от предыдущих разработок ИО РАН заключается в максимальном использовании цифровой обработки сигналов. Аналоговыми элементами являются усилитель мощности передающего блока и предварительный усилитель эхосигналов. Использование АЦП в подводном блоке позволило отказаться от специализированных электронных блоков в судовой части БНПА. Переход к операциям с цифровыми сигналами сделал возможным довольно просто перейти к согласованной фильтрации эхосигналов на базе корреляционного преобразования и использования зондирующих импульсов с ЛЧМ несущей частоты, что позволило на порядок увеличить энергетический

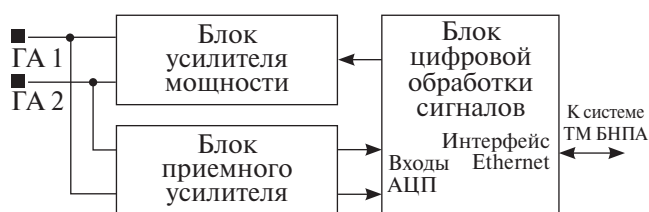


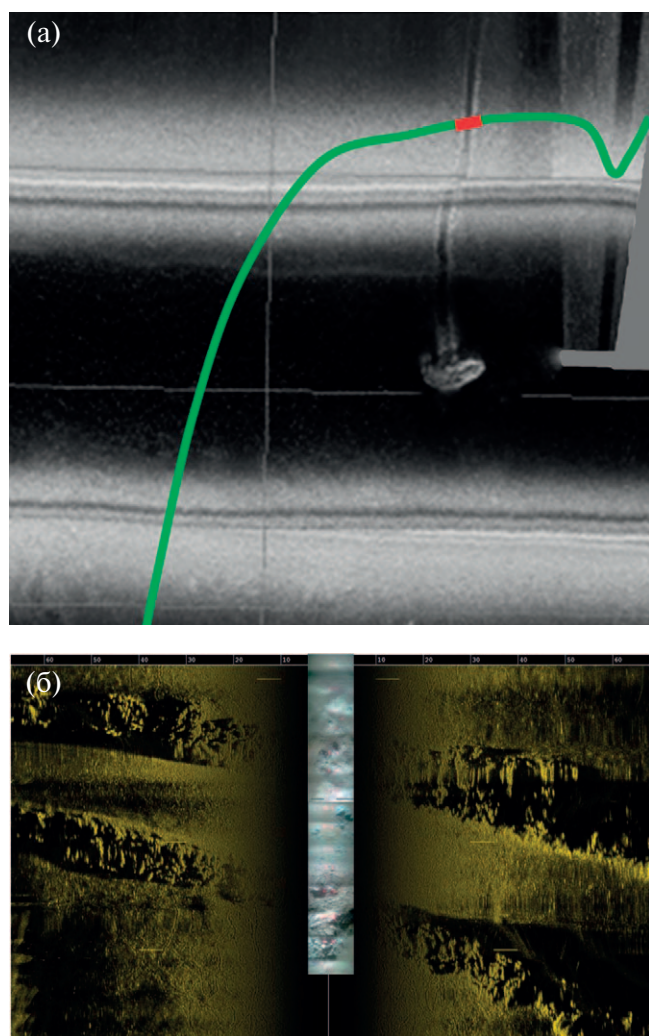
Рис. 3. Функциональная схема подводной части ГБО-ВМ. На рисунке обозначено: ГА — гидроакустическая антенна, АЦП — аналого-цифровой преобразователь, ТМ — система телеметрии.

потенциал и разрешающую способность ГБО. Использование цифрового интерфейса Ethernet позволило легко внедрить ГБО в структуру БНПА, поскольку этот интерфейс используется системой ТМ БНПА для связи с другими блоками. Основные характеристики блока цифровой обработки сигналов:

- длительность генерируемого ЛЧМ-импульса: до 600 мкс;
- частота девиации ЛЧМ-сигнала: до 60 кГц;
- несущая частота ЛЧМ-сигнала: 240 кГц;
- разрядность АЦП: 12 бит;
- частота дискретизации АЦП: 192 кГц;
- порядок согласованного фильтра: регулируемый от 0 до 115.

Первая экспериментальная съемка с использованием ГБО-ВМ показала высокую эффективность комплексного применения современных видео- и гидролокационных технологий наблюдений с борта БНПА. Испытания проводились на полигоне «Оден» на шельфе моря Лаптевых в районе подводной разгрузки природного газа и флюидов вблизи бровки континентального склона. Ранее здесь была зарегистрирована форма рельефа — след (борозда), оставленная крупным айсбергом. В районе этого следа наблюдалось увеличение интенсивности подводной разгрузки природного газа. В этой связи в 2018 г. была предпринята попытка выполнить визуальное наблюдение структуры этого следа с помощью видеосистемы БНПА «Видеомодуль». Одновременно в процессе наблюдений был испытан макет ГБО-ВМ. На рис. 4а приведен фрагмент гидролокационной мозаики, полученной в 2017 г. с использованием ГБО «Мезоскан» с рабочей частотой 70 кГц и длительностью тонального зондирующего сигнала 0.2 мс. На изображении видно место остановки айсберга и след от его движения.





**Рис. 4.** Гидролокационные изображения поверхности дна в районе подводной разгрузки природного газа «Один» в море Лаптевых, полученные методом гидролокации бокового обзора и подводной видеосъемки: (а) — фрагмент гидролокационной мозаики, полученной в 2017 г., со следом айсберга и линией маршрута БНПА «Видеомодуль», выполненного в 2018 г.; (б) — фрагмент записи ГБО-ВМ (технология «chigr»), полученной в месте пересечения следа айсберга и маршрута БНПА. По оси записи выложены синхронные кадры видеоизображения дна.

Светлой извилистой линией на рис. 4а показан маршрут буксировки БНПА «Видеомодуль» в 2018 г., пересекающий след айсберга. На рис. 4б представлен фрагмент записи гидролокационного изображения, полученной с помощью ГБО-ВМ в месте пересечения следа айсберга. На записи видны две отвалы, сформированные при вспахивании айсбергом верхнего слоя рыхлых отложений. По оси записи ГБО-ВМ на рис. 4б выложены кадры видеозаписи изобра-

жения поверхности дна, полученные синхронно с помощью HD-камеры БНПА «Видеомодуль». На видеоизображении отчетливо просматриваются светлые карбонатные корки и бактериальные конгломераты голубоватого оттенка. Оценка высоты отваловых гряд по гидролокационному изображению дает величину 1.5–2.0 м, а общей ширины следа — 25–30 м. Выровненная процессами седиментации поверхность дна между грядами свидетельствует о многолетнем отрезке времени, прошедшем с момента образования следа.

Таким образом, в результате опытной эксплуатации ГБО-ВМ в составе БНПА «Видеомодуль» доказана целесообразность использования методики синхронной видео- и гидролокационной съемки для исследований придонной области океана, в том числе морфологии микро- и мезорельефа дна, базирующейся на новейших технических решениях в области подводной видеосъемки, генерации и обработки гидроакустических сигналов, а также средствах передачи информации по оптоволоконным линиям связи.

**Источник финансирования.** Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2019-0011) при поддержке РФФИ (проекты Арктика № 18-05-60070, Pго\_a 17-05-41041); раздел, посвященный созданию БНПА «Видеомодуль», выполнен на средства проекта РНФ (проект № 14-50-00095).

**Благодарности.** Авторы благодарят экипаж и капитана НИС «Академик Мстислав Келдыш» Ю. Н. Горбача за содействие в проведении экспериментальных работ и исследований.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поляков С. Г., Римский-Корсаков Н. А., Флинт М. В. Технические аспекты исследований окружающей среды западной части Карского моря // *Океанологические исследования*. 2017. Т. 45. № 1. С. 171-186. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2017.45 (1).13.
2. Римский-Корсаков Н. А., Никитин Г. А. Гидролокационные технологии и средства исследования дна Мирового океана // *Подводные технологии и средства освоения Мирового океана* / Под редакцией академика Спасского И. Д. М.: Издательский дом «Оружие и технологии», 2011. С. 92-101.
3. Римский-Корсаков Н. А., Сычев В. А. Многоцелевой гидролокатор бокового обзора «Мезоскан-М» // *Материалы 10 научно-технической конференции «Современные методы и средства океанологических исследований»*. М.: ИО РАН, 2007. Ч. 2. С. 15-20.

4. *Флинт М. В., Зацепин А. Г., Кучерук Н. В., Поярко-ков С. Г., Римский-Корсаков Н. А.* Комплексные исследования экосистемы Карского моря (54-рейс научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш») // *Океанология*. 2008. Том 48. № 6. С. 947-951.
5. *Флинт М. В., Поярко-ков С. Г., Римский-Корсаков Н. А.* Экосистемы российской Арктики-2015 (63-й рейс научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш») // *Океанология*. 2016. Т. 56. № 3. С. 499-501.
6. *Флинт М. В., Поярко-ков С. Г., Римский-Корсаков Н. А.* Экосистемы морей сибирской Арктики-2017 (69-й рейс научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш») // *Океанология*. 2018, Т. 58. № 2. С. 331-333.

## COMPLEX INSTRUMENTAL UNDERWATER OBSERVATIONS TECHNOLOGY DEVELOPMENT RELATING TO THE ECOSYSTEMS OF THE RUSSIAN ARCTIC

© 2019 N. A. Rimsky-Korsakov\*, M. V. Flint, S. G. Pojarkov, I. M. Anisimov,  
Y. I. Belevitnev, A. A. Pronin, S. N. Tronza

*Shirshov Institute of Oceanology,  
Russian Academy of Science, Moscow, Russia  
e-mail: nrk@ocean.ru*

Received January 30, 2019  
Revised version received January 30, 2019  
After revision February 05, 2019

The article touches upon the methodological problems of underwater investigation of the bottom fauna, plants, micro and meso-relief of the Russian Arctic in connection with the study of regional ecosystems. The methods and technical means of underwater observations used in the Arctic expeditions of the Institute of Oceanology are considered. Technical solutions that increase the effectiveness of sonar and visual inspection of the bottom surface are proposed. The results of experimental studies are given.

**Keywords:** underwater exploration, fauna, plant, micro- and mesorelief, seas of the Russian Arctic