© А.Г. Островский, 2018, Океанологические исследования, 2018, Том 46, № 2, С. 53–68

УДК 551.46.07 DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(2).6

# ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ АВТОНОМНЫХ ПОДВОДНЫХ ПРОФИЛИРУЮЩИХ АППАРАТОВ

**А.Г. Островский**

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН*
*117997, Москва, Нахимовский проспект д. 36, e-mail:osasha@ocean.ru*

Статья поступила в редакцию 01.06.2018, одобрена к печати 18.06.2018

Автономные подводные профилирующие аппараты (АППА) предназначены для измерений вертикальных профилей течений и характеристик морской среды. К АППА относятся зонды, перемещающиеся по вертикально натянутому тросу на буйковых станциях. С помощью профилографа измерения выполняются одним набором датчиков во всем столбе воды от приповерхностного слоя до дна, что позволяет получить однородные данные с одинаковой точностью. При работе аппарат поддерживает стабильную ориентацию относительно направления течения, что немаловажно для измерений скорости и направления течений. В целом, такой аппарат представляет собой удобную платформу для размещения гидроакустического оборудования. В статье на примере заякоренного подводного профилирующего аппарата Аквалог рассмотрен состав гидроакустического оборудования АППА, предназначенного для связи и передачи данных, для измерений скорости течения и мелкомасштабных неоднородностей, а также для пеленгации самого аппарата.

**Ключевые слова:** автономные подводные профилирующие аппараты, акустический доплеровский измеритель течений, гидроакустический маяк, измеритель обратного рассеяния звука, гидроакустический модем

## Введение

Беспилотные аппаратные платформы для зондирования Мирового океана часто используются в качестве носителей гидроакустического оборудования. Движущиеся беспилотные аппаратные платформы широко применяются для выполнения разрезов и площадных съемок в Мировом океане. Гидроакустическое оборудование в таких аппаратах используется в первую очередь для навигации и связи (см., например, Ваулин и др., 2017). Полезная нагрузка автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), как правило, включает гидролокатор бокового обзора и акустический (Борейко и др., 2011; Матвиенко и др., 2015). На АНПА также устанавливают векторно-скалярный приемник и многолучевой эхолот. АНПА оснащают акустическим доплеровским профилографом течений (ADCP) для проведения измерений по маршруту движения. Для гидроакустического мониторинга наиболее приспособлены глайдеры, бесшумно планирующие под водой (D’Spain et al., 2005; D’Spain et al., 2007; D‘Spain et al., 2007). Планер глайдера X-Ray имеет широкие крылья, несущие решетки гидроакустических антенн. Более поздняя версия такого глайдера, получившая название Z-Ray, укомплектована антеннами, работающими как минимум в 3-х диапазонах: 10 Гц–15 КГц, 10 Гц–100 КГц, 20 Гц–2 КГц.

В отличие от АНПА и глайдеров, заякоренные автономные подводные профилирующие аппараты (АППА) предназначаются в основном для получения временных рядов вертикальных профилей гидрофизических, акустических и биологических характеристик в фиксированных географических точках (Ostrovskii et al., 2011; Островский и др., 2013). Особую ценность представляют регулярные однородные измерения вертикальных профилей характеристик морской среды, которые наряду с разрезами и площадными съемками позволяют изучить временную изменчивость в целях четырехмерной океанографии. При этом важную роль играет гидроакустическое оборудование. Ниже на примере аппарата Аквалог рассмотрены состав и область применения гидроакустической аппаратуры, устанавливаемой на АППА.

**Заякоренный мобильный профилирующий аппарат Аквалог**

Заякоренный профилограф Аквалог предназначен для измерений гидрофизических, гидрохимических и биоокеанологических характеристик в фиксированной географической точке акватории (Ostrovskii et al., 2011; Островский и др., 2013). Измерения выполняются одним набором датчиков от приповерхностного слоя до придонного слоя с вертикальным разрешением не хуже 1 м, что позволяет получить однородные данные с одинаковой точностью.

Аппарат регулярно по установленной программе перемещает полезную нагрузку с заданной скоростью с помощью электромеханического привода по тросу буйковой станции между подповерхностной плавучестью и донным якорем. Перемещение осуществляется за счет вращения приводного ролика, взаимодействующего с буйрепом. Аппарат имеет удобообтекаемую форму, чтобы поддерживать стабильную ориентацию относительно течения, что немаловажно для измерения его скорости и направления.

Станция Аквалог, как правило, ставится в море на долгий срок до 1 года. В результате исследователь получает длительные временные ряды вертикальных тонкоструктурных профилей параметров морской среды.

Аппарат изготавливается мелкими сериями в 3-х модификациях, в зависимости от глубины постановки и продолжительности автономной работы с учетом требований к составу океанологических измерительных датчиков. В стандартном исполнении аппарат имеет максимальную рабочую глубину 1000 м, при этом габариты и масса носителя в воздухе составляют соответственно 1.45×0.35×0.65 м и 68 кг (рис. 1). Аппарат для работы в области шельфа и верхней части континентального склона на глубинах до 500 м имеет меньшую длину – 1.15 м и массу около 48 кг. Аппарат для долговременных постановок имеет те же габариты, что и стандартный, при большей массе на 4 кг и при увеличенной емкости батарейного блока на 30%, но может использоваться только с определенными океанологическими датчиками.

Рис. 1. Заякоренный мобильный профилирующий аппарат Аквалог в стандартном исполнении с навесными океанологическими датчиками и гидроакустическим модемом EvoLogics S2C R (в верхней части прибора)

## Гидроакустическое оборудование профилографа Аквалог

Гидроакустическое оборудование применяется в профилографе Аквалог для решения следующих задач:

- контроля местоположения аппарата;
- передачи данных измерений и получения команд;
- акустического доплеровского измерения скорости течения;
- измерения обратного рассеяния звука на внутриводной взвеси.

### *Гидроакустический маяк*

Определение местоположения аппарата Аквалог под водой важно, так как буйковая станция с притопленной плавучестью ставится скрытно. При постановке станция может отдрейфовать или сползти по наклонному дну под действием сильного течения. Для поиска станции перед ее подъемом целесообразно точнее определить ее местоположение. Местоположение аппарата контролируется с помощью пеленгатора на судне и источника звука (пингера) на самом аппарате. Пеленг определяется в системе координат, связанной с обеспечивающим судном, на котором установлен пеленгатор.

Принцип действия пеленгатора, как правило, основан на определении в одной точке приема давления и градиента давления импульсного акустического сигнала, регистрируемого приемной антенной с ультракороткой базой. Направление на источник сигнала, устанавливаемый на подводном аппарате, определяется относительно опорного направления несущей конструкции.

Например, основные технические характеристики пеленгатора «Вектор», разработанного ООО НПП АКМА (*http://www.npo-akma.ru/vector.html*):

- диапазон рабочих частот, кГц: от 5 до 20;
- погрешность определения пеленга, град.: 5.

В состав гидроакустического пеленгатора «Вектор» входят:
- приемная антенна, размещаемая на несущей конструкции (плавсредстве);
- блок вычисления пеленга на базе спецпроцессора;
- пингер;
- специализированное программное обеспечение.

На аппарате Аквалог могут устанавливаться маяки и транспондеры производства других компаний, например JW Fishers (*http://www.jwfishers.com/products.html*). JW Fishers производит маяки и транспондеры с возможностью выбора частоты перед установкой, которые могут быть настроены на работу на любой частоте в диапазоне от 20 до 50 кГц с дискретным шагом по 500 Гц. Маяки имеют гибкие настройки длительности подачи импульсов, выходной акустической мощности и интервала времени между импульсами. В зависимости от настроек и емкости батареи, они могут работать от нескольких дней до нескольких месяцев. Маяки могут включаться автоматически при попадании в воду или вручную при помощи выключателя.

*Гидроакустический модем*

Для передачи телеметрической информации, команд и данных измерений в составе профилографа Аквалог используются цифровые гидроакустические модемы EvoLogics (*https://www.evologics.de/en/products/acoustics/s2cm_series.html*) (рис. 2) или Teledyne Benthos (*http://www.teledynemarine.com/acoustic-modems*) (рис. 3).

Рис. 2. Гидроакустический модем EvoLogics S2C R на аппарате Аквалог

Использование гидроакустического модема EvoLogics S2C на профилографе Аквалог было описано в статье (Островский и др., 2009). Здесь отмечу лишь, что этот модем является многофункциональным и применяется в качестве:

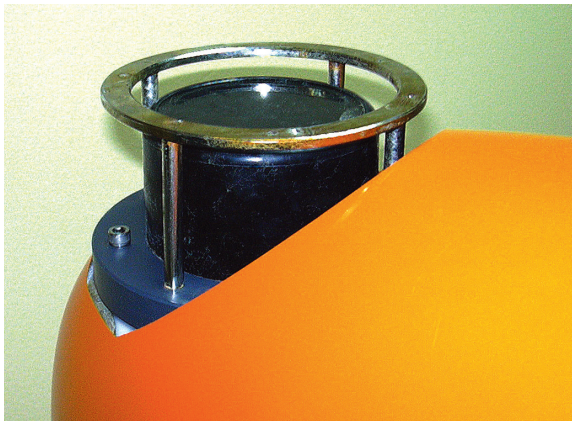

Рис. 3. Гидроакустический модем Benthos ATM585 на аппарате Аквалог

- устройства скоростной передачи данных 6.5–56 кбод (канал данных);
- устройства многопотоковой передачи данных – 8, 16 асинхронных / параллельных потоков / логических каналов с управляемыми приоритетами;
- устройства робастной передачи управляющих команд с пониженной скоростью (канал управления).

Причем он может использоваться для реализации отдельного устройства (из указанных выше) или в качестве комбинированного устройства, выполняющего функции множества устройств на базе одного единственного модема. В случае одновременного использования одного и того же модема для организации канала данных и канала управления обеспечивается режим доставки команд управления в качестве срочных/внеочередных сообщений.

Рабочая дальность модема EvoLogics S2C R 40/80 составляет 2 км, максимальная дальность – 2.5 км; скорость передачи данных достигает 33 Кбит/с.

*Измеритель течений*

Профилограф Аквалог находится в сцеплении с вертикально натянутым буйрепом в трех точках: на верхнем и нижнем направляющем роликах и на шкиве электропривода. Его кожух имеет форму обтекаемого вертикального крыла длиной 0.6 м и шириной 0.35 м. Благодаря этому осуществляется стабилизация положения аппарата в потоке воды, что дает возможность проводить измерения скорости течения. Основы акустического доплеровского метода в приложении к дистанционному измерению течения в океане изложены в работах (Муякшин, 1989; Муякшин, Селивановский, 1982; Муякшин и др., 1984).

Для профилографа Аквалог была проведена системная интеграция пока лишь трех акустических доплеровских измерителей течений: Teledyne RDI (TRDI) DVS (*http://www.teledynemarine.com/doppler-volume-sampler/?BrandID=16*, рис. 4) и Nortek Aquadopp (*https://www.nortekgroup.com/products/aquadopp-3000m*, рис. 5) и Nortek Vector (*https://www.nortekgroup.com/products/vector-300-m*). Из-за особенностей конструкции аппарата Аквалог измеритель TRDI DVS монтируется только в нижней части прибора, а измеритель Nortek Aquadopp – в верхней или в нижней частях прибора.

При монтаже в верхней/нижней части прибора измерения производятся путем импульсного зондирования водной толщи снизу вверх/сверху вниз.

Рис. 4. Акустический доплеровский профилограф течений Teledyne RDI DVS на аппарате Аквалог (Красное море, 2011 г.)

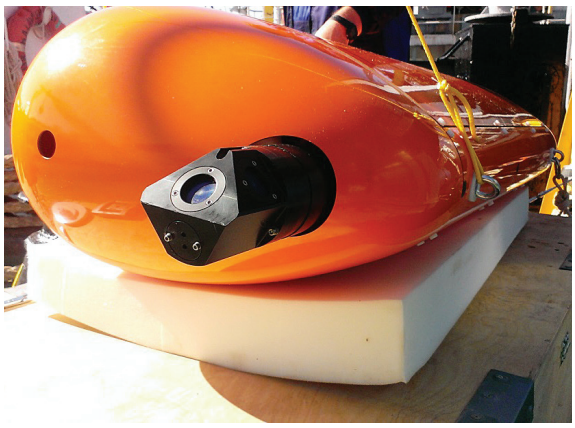

Рис. 5. Глубоководный акустический доплеровский измеритель течений Nortek Aquadopp 3000 m на профилографе Акалог (Японское море, 2014 г.)

Прибор Teledyne RDI (TRDI) DVS работает на частоте 2458 кГц. В его основе – классический 4-хлучевой широкополосный акустический доплеровский профилограф течения (Brumley et al., 1996), причем лучи направлены под углом 45° к вертикальной оси. Прибор измеряет доплеровский сдвиг частоты рассеянного сигнала по каждому из лучей с частотой до 40 Гц и, используя данные измерений по всем 4 лучам, рассчитывает с частотой 1 Гц направление и скорость течения в 5 слоях вдоль продольной оси прибора на удалении до 5 м относительно головки излучателей.

Прибор Nortek Aquadopp выпускается и как профилограф, и как «точечный» измеритель. Это 3-хлучевой прибор. Изначально он был узкополосным, но производитель перешел на широкополосную технологию, после завершения срока действия соответствующего патента на изобретение (Brumley et al., 1996). Nortek Aquadopp излучает сигнал на частоте 2 МГц. Измерения проводятся с частотой до 23 Гц, а скорость течения стандартно рассчитывается с частотой 1 с.

Прибор Nortek Aquadopp выпускается с антенными головками разных геометрических конфигураций, одна из которых представляет особый интерес для использования на профилирующем носителе Аквалог. Речь идет об антенной головке, в которой два излучателя из трех работают в плоскости перпендикулярной продольной оси прибора (рис. 6). Так как прибор Aquadopp устанавливается вертикально на носитель Аквалог, два луча зондируют воду под малыми углами к горизонтальной плоскости, что позволяет проводить измерения с высоким разрешением по вертикали примерно 0.2 м, так как скорость перемещения носителя Аквалог, как правило, составляет около 0.2 м/с. Причем измеритель Aquadopp повернут на носителе таким образом, чтобы луч B3 находился в вертикальной плоскости перпендикулярной вертикальной продольной плоскости, т.е. излучатели зондировали водную среду с боковой стороны от носителя, где минимальны гидродинамические возмущения, возникающие при обтекании системы в потоке воды.

Рис. 6. Головка излучателей прибора Nortek Aquadopp 300 m.
Вверху – общий вид, внизу – схема акустических лучей B1, B2, B3

Каждый из измерителей течений, интегрированных на аппарате Аквалог, имеет свои преимущества. Помимо апертуры антенны, другим важным критерием выбора измерителя является частота определения азимута и углов дифферента и крена акустической антенны. Акустический доплеровский измеритель течений имеет встроенный инклинометр и компас. Эти датчики дают важную информацию о положении всей системы под водой и учитываются при расчетах скорости течения. У прибора Teledyne RDI (TRDI) DVS частота опроса инклинометра и компаса составляет 15 Гц, а у прибора Nortek Aquadopp только 4 Гц, причем в мелководном его варианте. Чем чаще обновляется информация о положении акустической антенны, тем меньше погрешности расчета скорости течения, связанные с поступательным движением и вращением измерительной системы относительно буйрепа. Для того, чтобы провести максимально полную коррекцию данных о скорости

течения на эффекты, связанные с колебаниями буйрепа, необходимо восстановить движение системы под водой, а для этого надо иметь как минимум 3 дополнительных инерциальных датчика, например, типа XSENSE MTi 100 в нижней, центральной и верхней частях профилирующего носителя для отслеживания его перемещений в трехмерном пространстве. Отмечу, что колебания буйрепа, заякоренного на дне и натянутого притопленной плавучестью вертикально, возникают под воздействием течений и внутренних волн на притопленную плавучесть и могут быть значительными по амплитуде. Колебания можно отфильтровать статистическими методами, но за счет частичной потери информации о тонкой структуре течений. Как правило, на этапе предварительной обработки используется окно усреднения 5 с для фильтрации эффектов колебаний измерительной системы, поэтому в таком случае после предварительной обработки вертикальные профили скорости течений имеют разрешение 1 м.

Описанный выше подход к измерению вертикального профиля скорости течения имеет ряд преимуществ по сравнению с обычным методом измерений с помощью акустического доплеровского профилографа течений (ADCP) на буйковой или донной станции. Для примера, в табл. 1 приведены характеристики двух измерительных систем Nortek ADCP Signature55 и носителя Аквалог с измерителем Nortek Aquadopp.

Таблица 1. Характеристики измерительных систем Nortek ADCP Signature55 и Nortek Aquadopp на носителе Аквалог

| **Параметр** | **Nortek ADCP Signature55** | **Nortek Aquadopp на носителе Аквалог** |
|---|---|---|
| Рабочая частота | 55 кГц | 2000 кГц |
| Дальность или рабочий диапазон системы | 2–1000 м | 5–1000 м |
| Вертикальный размер объема воды, в котором вычисляется скорость течения | 5 м | 1 м |
| Горизонтальный размер объема воды, в котором вычисляется скорость течения | 64 м на дальности 100 м, 642 м на максимальной дальности 1000 м | 0.75 м |
| Время осреднения по 100 звуковым импульсам | 300 с | < 5 с |

Nortek ADCP Signature55 излучает ультразвуковые импульсы в трех конусных лучах (угол раствора 4.5°–5.5°) и улавливает эхо-сигналы, отраженные от отдельных рассеивателей или групп рассеивателей, измеряя доплеровский сдвиг частоты рассеянного сигнала послойно в слоях заданной толщины в каждом конусном луче. При этом для вычисления вектора скорости течения предполагается, что скорость течения не меняется в объеме тетраэдра, ребрами которого служат конусные лучи.

Поскольку конусные лучи наклонены относительно вертикальной оси на угол 20°, на дальности 1000 м от антенны они разнесены по горизонтали на расстояние около 640 м. Предположение об отсутствии горизонтального сдвига скорости течений на таком расстоянии не вполне приемлемо.

Применительно к прибору Nortek Aquadopp, работающему на частоте 2000 кГц, значительно более реалистично допущение, что подавляющее число неоднородностей водной среды, участвующих в создании эхо-сигналов, пассивно переносится окружающей жидкостью. А вот отражение на частоте 55 кГц более чувствительно к крупным объектам (размером более 7 мм), включая нектон, то есть активно плавающим организмам, способным противостоять силе течения и самостоятельно перемещаться, что может вносить дополнительную неопределенность в измерения скорости течения прибором Nortek ADCP Signature55.

Для получения надежной оценки среднего значения скорости течения целесообразно осреднить данные по 100 зондирующим импульсам. Этого достаточно, чтобы получить статистически значимые оценки каждые 5 с по слоям толщиной примерно 1 м. Отмечу, что для выполнения всего 1000 м профиля носителю Аквалог понадобится 5•103 с. Это почти в 17 раз дольше, чем требуется для достоверной оценки среднего профиля скорости течения в том же столбе воды с помощью Nortek ADCP Signature55, конечно, при условии, что течение горизонтально однородно на масштабе порядка 100 м, а стаи нектона отсутствуют.

С помощью акустических доплеровских измерителей на носителях Аквалог удалось получить тонкоструктурные профили течений во многих морях России, а также в Средиземном, Красном и Мертвом морях. В Черном море станция Аквалог работала с 2011 по 2017 гг., а в Балтийском море с 2014 г. по настоящее время.

На рис. 7 представлен пример данных измерений течения в точке 44°29.44′с.ш., 37°58.38′в.д. на изобате 265 м на траверзе Геленджикской бухты Черного моря в период с 26 июня по 22 августа 2011 г. Каждые сутки профилограф автоматически выполнял 8 циклов профилирования. В начале каждого цикла профилограф опускался с парковочного горизонта 100 дбар до глубины 200 дбар, выстаивался 3 мин., затем поднимался до отметки 15 дбар, выстаивался 15 мин. и опускался на парковочный горизонт. На выполнение одного цикла профилирования уходило около 52 мин. Как следует из рис. 7, в период наблюдений прошли два прибрежных антициклональных вихря (ПАВ) 2–6 июня и 17–23 августа. Измерения с помощью Nortek Aquadopp на носителе Аквалог позволяют детально описать вертикальную структуру вихрей. Ядро первого вихря располагалось в слое 30–130 м. Второй вихрь был мощнее, максимальная скорость течения превышала 0.4 м/с. Также на протяжении всей постановки были развиты инерционные колебания. Их интенсивность была довольно необычной для летнего сезона, когда должна преобладать маловетреная погода. Причем спектральный анализ показал, что пик инерционных колебаний приходится на период 16.1 часа, то есть меньше на 1 час значения периода, рассчитанного по классической формуле для инерционных колебаний.

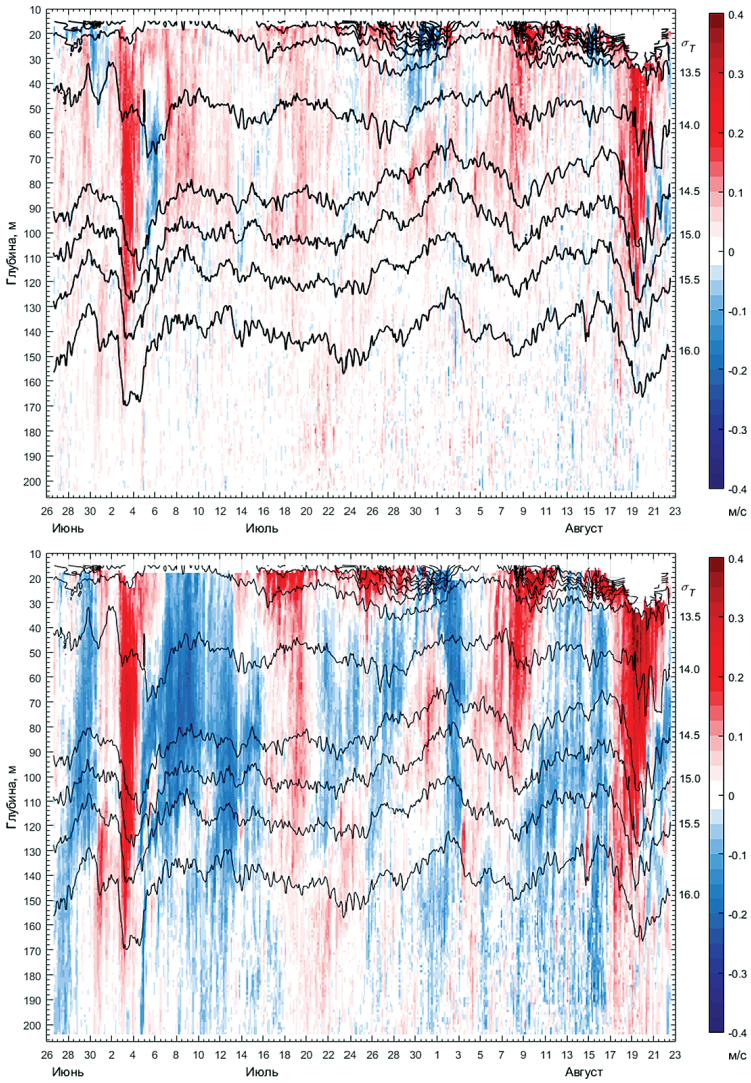


Рис. 7. Скорость течения над верхней частью континентального склона в районе Геленджикской бухты Черного моря летом 2011 г. по данным измерений Nortek Aquadopp 3000 m на носителе Аквалог. Вверху – кросс-шельфовый компонент скорости (положительное направление на северо-восток - 30°), внизу – вдоль-шельфовый компонент скорости течения (положительное направление на северо-запад - 300°). Черными линиями показаны изопикны по данным СТД-зонда Idronaut 316 CTD, также установленного на профилографе Аквалог

### *Измеритель обратного рассеяния звука*

Для исследования тонкой структуры океанской экосистемы необходимы вертикальные профили характеристик морской среды с разрешением не хуже 1 м. Тонкие звукорассеивающие слои указывают на скопления фитопланктона и мезозоопланктона в зонах скачков плотности и повышенных градиентов температуры и солености воды. Скопления биоты могут исчезнуть в считанные часы под воздействием быстрых гидрофизических процессов, таких как тонкоструктурные интрузии и конвекция. Для наблюдений перемежающихся явлений и внутрисуточных изменений в экосистеме достаточно проводить измерения вертикальных профилей

1 раз в час. За это время аппарат АППА Аквалог выполняет цикл спуск/подъем в 300-метровом слое воды.

Акустические доплеровские измерители течений на профилографе Аквалог регистрируют интересные данные об эхо-сигнале. На частотах 2000 кГц и выше, на которых работают приборы Nortek Aquadopp и TRDI DVS, обратное рассеяние звука происходит на скоплениях внутриводной взвеси: фитопланктоне, мезозоопланктоне, детрите и частицах терригенного происхождения. К сожалению, эти приборы поставляются без калибровочных данных на излучатели, и поэтому рассчитать интенсивность звукового сигнала, падающего на мелкомасштабную неоднородность в водной среде, не представляется возможным.

В работе (Ostrovskii, Zatsepin, 2011) было показано, что в акватории континентального склона северо-восточной части Черного моря вертикальная стратификация морской среды создает уникальные условия формирования звукорассеивающих слоев (на частоте 2000 кГц):

- в сероводородной зоне глубже 140–160 м звук рассеивается на частицах осаждающегося материала (в основном биогенного происхождения), потоки которых характеризуются значительной временной изменчивостью,
- в редокс-зоне и оксисклине (~50–140 м) рассеивание звука происходит как на взвешенных частицах, так и на мезозоопланктоне,
- в эвфотиченской зоне (верхние 50 м) к этим рассеивателям звука добавляются скопления фитопланктона.

На фоне общей трехслойной структуры выделяются тонкие (толщиной порядка 1 м) звукорассеивающие слои под скачком температуры в сезонном термоклине, а также в зоне диапаузы мезозоопланктона на изопикне ~15.9 единиц условной плотности (рис. 8).

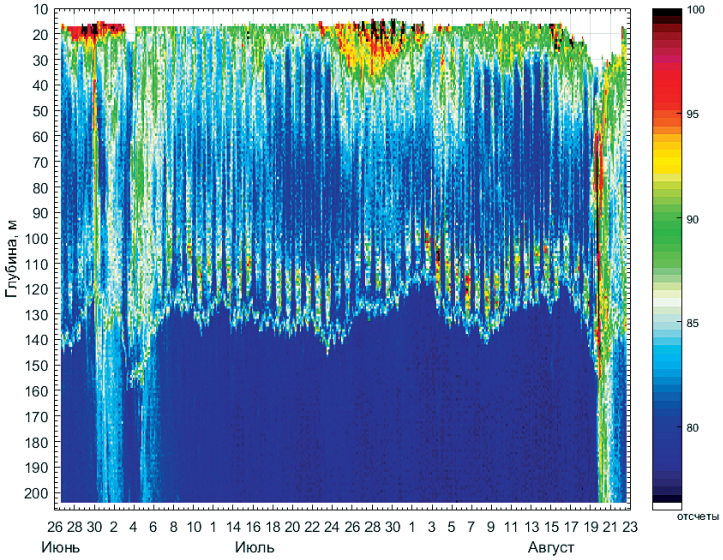


Рис. 8. Временная развертка вертикального профиля эхо-сигнала, полученного прибором Nortek Aquadopp на носителе Аквалог в районе Геленджикской бухты Черного моря летом 2011 г.

В ходе суточной миграции мезозоопланткон перемещается по вертикали на 100–120 м за 2–3 часа. Скопления мезозоопланктона наблюдаются между изопикнами 15.4 и 15.7 единиц условной плотности в дневное время, причем наблюдается межсуточная изменчивость амплитуды эхо-сигнала. Скопления начинают подъем примерно за 2 часа до заката, концентрируются на горизонтах 10–40 м между изопикнами 13 и 13.8 единиц условной плотности в ночное время и мигрируют вниз перед рассветом.

Прибор Nortek Aquadopp на носителе Аквалог с успехом использовался для изучения короткопериодной изменчивости седиментационного процесса в районе Геленджикской бухты Черного моря. В июне 2011 г. в ходе экспериментального исследования наряду со станцией Аквалог была установлена 12-стаканная седиментационная ловушка на горизонте 190 м (Клювиткин и др., 2016). Анализ осадочного материала, собранного в ловушку, показал, что облака взвеси, регистрируемые прибором Aquadopp, состоят из частиц размером 5–20 мкм. Основным продуцентом рассеянного осадочного вещества приповерхностного слоя океана является фитопланктон, чья пятнистость приводит в значительной изменчивости вертикального потока осадочного вещества. Значительное количество детрита накапливается и проваливается сквозь слой диапаузы мезозоопланктона, поэтому сгустки детрита дают большой вклад в создание эхо-сигнала в верхних слоях сероводородной зоны.

Еще более перспективным представляется многочастотное акустическое зондирование для оценивания размеров мелкомасштабных неоднородностей, на которых отражается и рассеивается звук. Данные об объемном рассеянии звука на различных частотах могут дать картину распределения по размерам взвешенных частиц в объеме воды, так как интенсивность рассеивания звука зависит от частоты звуковой волны, а также от количества неоднородностей в зондируемом объеме воды.

Рис. 9. Акустические излучатели прибора AQUAScat 1000s, смонтированные на фронтальной панели аппарата Аквалог над электроприводом

С этой целью на аппарате Аквалог устанавливается прибор AQUAScat 1000s (*http://www.aquatecgroup.com/aquascat/aquascat-1000s* рис. 9). AQUAscat 1000s излучает высокочастотные звуковые импульсы с помощью 4 трансдюсеров, каждый из которых работает на фиксированной частоте в диапазоне от 500 до 5000 кГц. Типичный размер неоднородностей, которые могут участвовать в создании эхо-сигналов, составляет от 40 мкм до 4 мм, а концентрация измеренного взвешенного вещества находится в пределах от 0.01 г/л до 20 г/л. Прибор AQUAScat позволяет получить профили эхо-сигналов по каждому лучу в 256 слоях толщиной 2.5–40 мм на максимальной дальности до ~10 м. Планируется использование данного прибора на носителе Аквалог для изучения цветения фитопланктона в западной части Средиземного моря.

## Перспективные разработки

Гидроакустическое оборудование уже стало неотъемлемой частью АППА. Однако потенциал этих аппаратов как носителей гидроакустического оборудования далеко не исчерпан.

На АППА может быть установлен измеритель скорости звука. Используя данные прямых измерений или рассчитывая скорость звука в воде по данным СТД-измерений, контроллер АППА может определять глубину залегания подводного звукового канала (ПЗК). Тогда регулярно сканируя водную толщу, АППА может отслеживать колебания положения ПЗК, и зависать в оси ПЗК на нужное время, при необходимости перемещаясь по вертикали.

АППА потенциально сочетает возможности мониторинга гидроакустической обстановки, проводя измерения в двух режимах: в состоянии нейтральной плавучести и в неподвижном состоянии, располагаясь попеременно на изопикнической поверхности и у морского дна. При этом на носителе перспективно применение векторно-скалярного приемника, состоящего из приемника звукового давления и градиента давления для обеспечения пространственной избирательности и повышения помехоустойчивости.

На АППА может быть интегрирована гидроакустическая система, предназначенная для позиционирования подводного аппарата с большого расстояния при взаимном расположении системы позиционирования и аппарата близком к горизонтальному. В этом случае одной из основных задач практической реализации станет разработка алгоритмов определения местоположения для систем с ультракороткой базой или длинной базой, позволяющих учитывать искривление трасс распространения сигнала вследствие вертикальной стратификации гидроакустической среды по скорости распространения звука (ультразвука). В отношении системы позиционирования с длинной базой задача разветвляется на разработку алгоритмов, основанных на двунаправленном обмене сигналами (в частности, трилатерации) и однонаправленном обмене сигналами (в частности, гиперболическом методе).

В перспективе через 5–10 лет АППА станут востребованы для выполнения задач подводной навигации автономных подводных аппаратов, а также для гидроакустического мониторинга.

Автор выражает особую признательность А.Г. Зацепину за энергичную поддержку работ по созданию автономных подводных профилирующих аппаратов. Автор глубоко благодарен Д.А. Швоеву – главному конструктору проектов, В.А. Соловьеву – системному программисту и А.Л. Цибульскому – инженеру-электронику.

Результаты исследований, представленные во Введении и в разделах 1, 2, 3.1, 3.2, 3.3 получены в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2018-0010). Результаты исследований, представленные в разделах 3.4 и 4 получены за счет средств РНФ (проект № 14-05-0095).

## Литература

*Борейко А.А., Горнак В.Е., Мальцева С.В., Матвиенко Ю.В., Михайлов Д.Н.* Малогабаритный многофункциональный автономный необитаемый подводный аппарат «МТ-2010» // Подводные исследования и робототехника. 2011. № 2. С. 37–42.

*Ваулин Ю.В., Инзарцев А.В., Львов О.Ю., Матвиенко Ю.В., Павин А.М.* Реконфигурируемая система управления и навигации для многофункциональных подводных роботов // Подводные исследования и робототехника. 2017. № 1. С. 4–13.

*Клювиткин А.А., Островский А.Г., Новигатский А.Н., Лисицын А.П.* Мультидисциплинарный эксперимент по изучению короткопериодной изменчивости осадочного процесса в северо-восточной части Черного моря // Докл. РАН. 2016. Т. 469. № 3. С. 356–360. DOI: 10.7868/S0869565216210209.

*Матвиенко Ю.В., Борейко А.А., Костенко В.В., Львов О.Ю., Ваулин Ю.В.* Комплекс робототехнических средств для выполнения поисковых работ и обследования подводной инфраструктуры на шельфе // Подводные исследования и робототехника. 2015. № 1. С. 4–15.

*Муякшин С.И.* Дистанционное измерение течений в океане акустическим доплеровским методом / Л.М. Бреховских, И.Б. Андреева // Акустика океанской среды. М.: Наука, 1989. С. 120–132.

*Муякшин С.И, Селивановский Д.А.* О гидролокационном измерении течений, вызванных внутренними волнами // Океанология. 1982. Т. 22. № 6. С. 1029–1032.

*Муякшин С.И., Селивановский Д.А., Соколов А.Ю.* Акустические методы диагностики внутренних волн и газовых пузырьков в море // Проблемы акустики океана. М., Наука, 1984. С. 164.

*Островский А.Г., Зацепин А.Г., Соловьев В.А., Цибульский А.Л., Швоев Д.А.* Автономный мобильный аппаратно-программный комплекс вертикального зондирования морской среды на заякоренной буйковой станции // Океанология. 2013. Т. 53. № 2. С. 259–268. DOI: 10.7868/S0030157413020147.

*Островский А.Г., Зацепин А.Г., Иванов В.Н., Кебкал К.Г., Низов С.С., Соловьев В.А., Тимашкевич Г.К., Цибульский А.Л., Швоев Д.А.* Заякоренная профилирующая океанская обсерватория // Подводные исследования и робототехника. 2009. № 2. С. 50–59.

*Brumley B.H., Deines K.L., Cabrera R.G., Terray E.A.* Broadband acoustic Doppler current

profiler: United States Patent. Patent Number 5483499. Date of Patent: Jan. 9, 1996.

*D'Spain G.L., Jenkins, S.A., Zimmerman, R., Luby, J.C., Thode, A.M.* Underwater acoustic measurements with the Liberdade/X-Ray flying wing glider // J. Acoust. Soc. Am. 2005. Vol. 117. No. 4. P. 2624. DOI: 10.1121/1.4778396.

*D'Spain G.L., Zimmerman R., Jenkins S. A., Luby J. C., Brodsky P.* Underwater acoustic measurements with a flying wing glider // J. Acoust. Soc. Am. 2007. Vol. 121. No. 5. P. 3107. *http://dx.doi.org/10.1121/1.4782033*.

*D'Spain G., Zimmerman R., Jenkins S. A., Rimington D. B., Luby J. C., Brodsky P.* Acoustic sensor systems on a flying wing underwater glider and two prop-driven autonomous underwater vehicles // J. Acoust. Soc. Am. 2008. Vol. 123. No. 5. P. 3007. *http://dx.doi.org/10.1121/1.2932590.*

*Ostrovskii A.G., Zatsepin A.G.* Short-term hydrophysical and biological variability over the northeastern Black Sea continental slope as inferred from multiparametric tethered profiler surveys // Ocean Dynamics. 2011. Vol. 61. P. 797–806. DOI: 10.1007/s10236-011-0400-0.

## HYDROACOUSTIC EQUIPMENT OF AUTONOMOUS UNDERWATER PROFILERS

**A.G. Ostrovskii**

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,*
*36 Nakhimovskiy prospect, Moscow, 117997, Russia, e-mail:osasha@ocean.ru*

Submitted 01.06.2018, accepted 18.06.2018

Autonomous underwater profilers are designed for measurements of vertical profiles of ocean currents and marine environmental parameters. Such device moves along a vertically stretched cable at the buoy stations. Generally, a profiler comprises convenient platform for mounting of hydroacoustic equipment. A suit of sensors installed at the profiler carries out the measurements in the water column from the near-surface layer to the bottom allowing a researcher to obtain uniform data with the same accuracy. During the survey, the device usually maintains a stable orientation relative to the direction of flow, which is important for acoustic Doppler measurements of the speed and direction of ocean currents. This paper deals with applications of the moored automatic mobile profiler Aqualog for underwater communication and data transmission, acoustic measurements of the flow velocity and small-scale inhomogeneities.

**Keywords:** autonomous underwater profilers, acoustic Doppler current meter, hydroacoustic beacon, sound backscaterr, hydroacoustic modem

### References

*Borejko A.A., Gornak V.E., Mal'tseva S.V., Matvienko Yu.V., and Mikhajlov D.N.* Malogabaritnyj mnogofunktsional'nyj avtonomnyj neobitaemyj podvodnyj apparat «MT-2010» (Compact multifunctional autonomous underwater vehicle MT-2010). *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika (Underwater investigation and robotics)*, 2011, No. 2, pp. 37–42.

*Brumley B.H., Deines K.L., Cabrera R.G., and Terray E.A.* Broadband acoustic Doppler current profiler. United States Patent. Patent Number 5483499. Date of Patent Jan. 9, 1996.

*D'Spain G.L., Jenkins S.A., Zimmerman R., Luby J.C., and Thode A.M.* Underwater acoustic measurements with the Liberdade/X-Ray flying wing glider, *J. Acoust. Soc. Am*., 2005, Vol. 117, No. 4, p. 2624, doi: 10.1121/1.4778396.

*D'Spain G.L., Zimmerman R., Jenkins S. A., Luby J. C., and Brodsky P.* Underwater acoustic measurements with a flying wing glider, *J. Acoust. Soc. Am.*, 2007, Vol. 121, No. 5, p. 3107, doi: 10.1121/1.4782033.

*D'Spain G., Zimmerman R., Jenkins S. A., Rimington D. B., Luby J. C., and Brodsky P.* Acoustic sensor systems on a flying wing underwater glider and two prop-driven autonomous underwater vehicles, *J. Acoust. Soc. Am.*, 2008, Vol. 123, No. 5, p. 3007, *http://dx.doi.org/10.1121/1.2932590*.

*Klyuvitkin A.A., Ostrovskii A.G., Novigatskii A.N., and Lisitzin A.P.* Multidisciplinary experiment on studying short-period variability of the sedimentary process in the northeastern part of the Black Sea, *Doklady Earth Sciences*, 2016, Vol. 469, Part 1, pp. 771–775, doi: 10.1134/S1028334X16070230.

*Matvienko Yu.V., Borejko A.A., Kostenko V.V., L'vov O.Yu., and Vaulin Yu.V.* Kompleks robototekhnicheskikh sredstv dlya vypolneniya poiskovykh rabot i obsledovaniya podvodnoj infrastruktury na shel'fe (System of robotic tools to perform search and surveylance on underwater infrastructure at the sea shelf), *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika (Underwater investigation and robotics),* 2015, No. 1, pp. 4–15.

*Muyakshin S.I.* Distantsionnoe izmerenie techenij v okeane akusticheskim doplerovskim metodom (Remote sensing of the currents in the ocean by using the acoustic Doppler method), In: Akustika okeanskoj sredy (Acoustics of the ocean media). Moscow: Nauka, 1989, pp. 120–132.

*Muyakshin S.I. and Selivanovskij D.A.* O gidrolokatsionnom izmerenii techenij, vyzvannykh vnutrennimi volnami (On sonar measurements of the currents generated by internal waves), *Okeanologiya*, 1982, Vol. 22, No. 6, pp. 1029–1032.

*Muyakshin S.I., Selivanovskij D.A., and Sokolov A.Yu.* Akusticheskie metody diagnostiki vnutrennikh voln i gazovykh puzyr'kov v more (Acoustic methods for diagnostics of internal waves and gas bubles in the sea), In: Problemy akustiki okeana (Problems of the Ocean Acoustics), Moscow: Nauka, 1984, p. 164.

*Ostrovskii A.G. and Zatsepin A.G.* Short-term hydrophysical and biological variability over the north-eastern Black Sea continental slope as inferred from multiparametric tethered profiler surveys, *Ocean Dynamics*, 2011, Vol. 61, pp. 797–806, doi: 10.1007/s10236-011-0400-0.

*Ostrovskii A.G., Zatsepin A.G., Soloviev V.A., Tsibulsky A.L., and Shvoev D.A.* Autonomous system for vertical profiling of the marine environment at a moored station, *Oceanology,* 2013, Vol. 53, No. 2, pp. 233–242, doi: 10.1134/S0001437013020124.

*Ostrovskii A.G., Zatsepin A.G., Ivanov V.N., Kebkal K.G., Nizov S.S., Solov'ev V.A., Timashkevich G.K., Tsibul'skij A.L., and Shvoev D.A.* Zayakorennaya profiliruyushhaya okeanskaya observatoriya (Moored profiling ocean observatory), *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika (Underwater investigation and robotics)*, 2009, No. 2, pp. 50–59.

*Vaulin Yu.V., Inzartsev A.V., L'vov O.Yu., Matvienko Yu.V., and Pavin A.M.* Rekonfiguriruemaya sistema upravleniya i navigatsii dlya mnogofunktsional'nykh podvodnykh robotov (Configurable system for control and navigation of multifunctional underwater robots), *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika (Underwater investigation and robotics),* 2017, No. 1, pp. 4–13.