

## ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.46.077

### АВТОМАТИЧЕСКИЙ ПОДЛЕДНЫЙ ЗОНД

© 2020 г. А. Г. Островский<sup>1, \*</sup>, А. Г. Зацепин<sup>1</sup>, Д. А. Швоев<sup>1</sup>,  
С. В. Волков<sup>1, 2</sup>, О. Ю. Кочетов<sup>1</sup>, В. М. Ольшанский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия

\*e-mail: osasha@ocean.ru

Поступила в редакцию 28.05.2020 г.

После доработки 27.07.2020 г.

Принята к публикации 04.08.2020 г.

Автоматизированный мониторинг среды в российском секторе Арктики остро нуждается в новых эффективных технических средствах для долговременных измерений. С этой целью в ИО РАН разрабатывается автономная ледовая дрейфующая станция с автоматизированным подледным зондирующим аппаратом. Статья посвящена разработке носителя переменной плавучести, перемещающегося циклическим образом вверх-вниз в водной толще вдоль троса с грузом на нижнем конце, который опущен в майну во льду. Носитель разработан в первую очередь под акустический доплеровский профилограф течений. Он также комплектуется STD-зондом, производящим измерения солёности, температуры и давления воды. Совместный анализ эхо-сигналов, отраженных от поверхности раздела вода/лед, и данных измерений гидростатического давления позволяет определять осадку льда. Кроме того, совместная обработка данных измерений вертикального распределения скорости течения и плотности воды позволяет рассчитать значения числа Ричардсона и коэффициента вертикального турбулентного обмена массой. В статье представлены состав и конструкция аппарата. Приведена гидравлическая схема системы изменения плавучести носителя.

**Ключевые слова:** Арктика, автономный зондирующий аппарат, носитель переменной плавучести, акустический доплеровский профилограф течений, STD-зонд, осадка льда

**DOI:** 10.31857/S0030157420060106

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа выполнена в рамках темы по созданию автономной ледовой станции для мониторинговых измерений вертикального распределения параметров морской среды в Арктике, а также определения толщины льда и регистрации метеорологических характеристик в приводном слое воздуха, с возможностью оперативной передачи данных измерений по каналу спутниковой связи в удаленный центр мониторинга. Работы по схожей тематике интенсивно ведутся за рубежом последние 15–20 лет. США, Канада, ЕС и Япония развернули в Арктике сеть автоматических дрейфующих станций, в основном, с использованием мобильного профилографа Ice Tethered Profiler (ИТР) [15]. Начиная с 2004 г., один только Вудсхольский океанографический институт (США) запустил 109 аппаратов ИТР на дрейфующих льдах в целях долговременного круглогодичного мониторинга состояния водной среды Арктики (<https://www.who.edu/page.do?pid=20781>).

Автоматизированный мониторинг в российском секторе Арктики остро нуждается в эффективных отечественных технических средствах. Разрабатываемая автономная ледовая дрейфую-

щая станция будет состоять из двух частей – подледной и ледовой (рис. 1), а именно:

– подледного океанологического аппарата (далее – зонда), оснащенного измерительными датчиками и системой передачи данных, автоматически передвигающегося вверх-вниз по тросу, который вывешен с грузом с плавучего буя-держателя на припайном или дрейфующем льду,

– буя-держателя (вмораживаемого в лед) с метеостанцией и с системами спутниковой связи Гонец-М или Iridium и навигации GPS/Глонасс.

Ниже представлена конструкция зонда, автоматически погружающегося на глубину и поднимающегося к нижней границе льда, оснащенного комплектом океанологических датчиков, специально подобранных для длительных подледных измерений. Аппаратно-программный комплекс управления зондом и испытания зонда описаны в отдельной статье [4].

#### 2. КРАТКИЙ ОБЗОР И ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К РАЗРАБАТЫВАЕМОЙ АППАРАТУРЕ

История систематического применения автономных автоматических профилографов водной

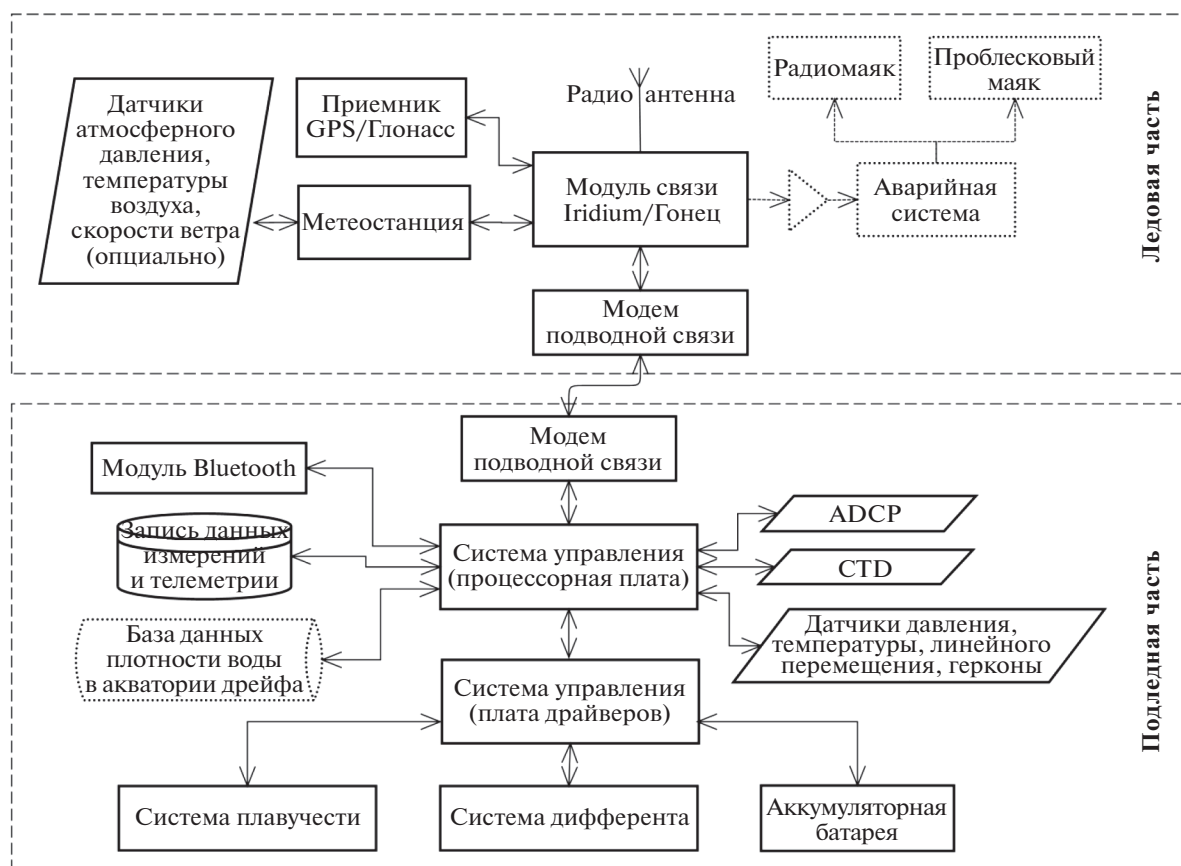


Рис. 1. Блок-схема автономной ледовой дрейфующей станции (обозначения по ГОСТу [2]).

среды в Арктике началась в 1983–1984 гг. с эксперимента MIZEX (Marginal Ice Zone Experiment) в проливе Фрама, где впервые были использованы аппараты Cyclesonde [16], уже зарекомендовавшие себя по океанографическим работам на морском шельфе. Этот аппарат двигался вверх-вниз по тросу заякоренной буйковой станции. В конструкцию аппарата Cyclesonde было заложено несколько оригинальных решений [17], некоторые из которых остаются актуальными до сих пор. В частности, аппарат имел переменную плавучесть за счет надува/сдува пузыря емкостью 600 см<sup>3</sup> сжатым гелием из акваланга, причем надув осуществлялся перед подъемом, а перед спуском газ стравливался в воду из пузыря. Ограниченный объем пузыря должен был обеспечивать выталкивающую силу, которая как минимум в 2 раза должна была бы превышать силу гидродинамического сопротивления в горизонтальном потоке воды. Из-за постоянного расхода газа автономность аппарата Cyclesonde была невысокой, продолжительность постановок буйковой станции, как правило, составляла несколько суток.

Чтобы минимизировать гидродинамическое сопротивление, обтекатель аппарата была придана вытянутая удобообтекаемая форма с вертикальным килем, а сам аппарат подвешивался к

тросу на ролике в горизонтальном положении, что способствовало его устойчивой ориентации в течении, при которой океанологические датчики производили измерения в набегающем потоке воды. В эксперименте MIZEX аппараты Cyclesonde с периодичностью 1 раз в час перемещались вверх-вниз вдоль тросов, вывешенных с льдин с грузом на конце, и производили зондирования верхней 200 м толщи воды в течение нескольких суток. В комплект океанологических датчиков каждого аппарата входили CTD-зонд и измеритель скорости течения с лопастной вертушкой типа ротора Савониуса с горизонтальной осью, принцип работы которой основан на зависимости скорости вращения лопастей вертушки от воздействия набегающего водного потока. Данные измерений записывались на магнитный носитель. Надводная часть такой станции, располагающаяся на льду, комплектовалась передатчиком ARGOS для отслеживания ее дрейфа.

В отличие от аппарата Cyclesonde, более современный прибор ITP, созданный по технологии McLane Moored Profiler [9], перемещается за счет электропривода, шкив которого катится по вертикально натянутому тросу вверх или вниз в зависимости от направления вращения мотора. Во избежание проскальзывания шкива используется

пружина, прижимающая его к тросу. Первоначально для прибора ИТР был разработан акустический доплеровский профилограф течений (англ. ADCP) TRDI DVS [9]. Однако этот измеритель мало использовался практически и недавно был снят с производства. Зондирующая система ИТР может измерять профили океанологических параметров до горизонта 800 м и более. Продолжительность автономной работы системы зависит от периодичности зондирований. Так, например, в экономном режиме работы при выполнении 1 цикла погружение/всплытие в сутки прибор может работать непрерывно один год и более. Обоим автономным зондирующим аппаратам Cyclesonde и ИТР перед постановками нужно придать такую массу, чтобы их плавучесть была близкой к нейтральной в гидрологических условиях исследуемых акваторий в целях обеспечения минимального по расходу энергии вертикального перемещения носителя вниз и вверх по тросу и экономии заряда батарей электропитания.

Работы по созданию отечественного автономного зондирующего аппарата были начаты в Московском авиационном институте (МАИ) по заказу ИО АН СССР. В 1979 г. в СКБ “Океан” МАИ был создан многофункциональный носитель гидрофизической аппаратуры, предназначенный для циклического зондирования водной толщи до 700 метров при погружениях-всплытиях по программе, предусматривающей возможность останова носителя на заданной глубине (<http://www.ainros.ru/kid/t3.pdf>). В ходе работ была изобретена система изменения плавучести носителя, которая позднее была взята за прототип системы изменения плавучести подводного аппарата [7]. К сожалению, нам не известны изделия, в которых было бы реализовано данное изобретение на практике, в частности, для работы подо льдом в Арктике. Российскими исследователями пока реализуется другой подход к проведению океанологических измерений в Арктике с помощью вмораживаемых в лед термокос на несущих дрейферах со спутниковым каналом связи, датчиками температуры воздуха и атмосферного давления [5]. Такие дрейферы могут рассматриваться не как альтернатива океанологической зондирующей системе, а лишь как дополнение к ней. Термокосы не измеряют профили солености и плотности вод, а также скорости течения и других важных параметров водной среды, таких как концентрация растворенного в воде кислорода, флуоресценция хлорофилла “а”, мутность. Кроме того, толщина слоя воды, который охватывается измерениями термокос, даже в перспективе не превышает 150 м. Необходимость зондирования до глубин 800–1000 м обусловлена хотя бы тем, что таким образом удается контролировать слой атлантических вод, которые являются основным источником тепла и соли для арктической водной среды. Созданный в России автономный зонд-профило-

граф Аквалог [6, 8], аналогичный по принципу работы аппарату [9], из-за своих массо-габаритных характеристик не удобен для работы со льда.

С 2018 г. ИО РАН ведет разработку нового зонда, пригодного для подледных измерений. Перед разработчиками была поставлена задача создания аппарата, перемещающегося вверх/вниз вдоль троса, опущенного со льда, с грузом на нижнем свободном конце. Причем в дополнение к тем функциям, которые имеют приборы Cyclesonde и ИТР, новый аппарат должен: а) обеспечивать измерения глубины осадки льда, б) обеспечивать измерения вертикального профиля скорости течения с условием минимизации измерительного шума из-за вибрации троса, в) передавать данные измерений на надводный модуль, располагающийся сверху на льдине. Зонд должен иметь ресурс батарей для автономной работы по продолжительности, сопоставимой с зондирующей системой ИТР. Рабочая глубина зонда должна быть не менее 800 м.

Исходя их поставленных задач по составу измерений, новый аппарат целесообразно оснастить ADCP. Следует отметить, что в настоящее время для измерений осадки льда используются не только специальные сонары [1, 11, 14], но и акустические доплеровские профилографы течений в комбинации с прецизионными датчиками гидростатического давления [10, 13]. ADCP, помимо применения по своему прямому назначению, может рассматриваться в качестве прибора, позволяющего дистанционно снизу зондировать ледяной покров. Сонары и ADCP в составе донных станций имеют ограничения на глубину района постановки из-за небольшой дальности акустического зондирования (обычно 20–50 м) с достаточно высоким вертикальным разрешением, хотя есть сонар с максимальной дальностью 175 м (<https://aslenv.com/ips.html>). Другое дело, если установить акустический измеритель на носитель, который может подниматься из глубины к ледяному покрову. Поэтому, в контексте поставленных в данной работе задач, новый зонд должен в первую очередь проектироваться как носитель ADCP.

Учитывая опыт предыдущих разработок, следует отметить, что аппарат ИТР, движущийся с помощью электропривода, плохо приспособлен для измерений скорости течения. Корпус этого аппарата имеет цилиндрическую форму, он устанавливается в вертикальном положении. Как известно, за цилиндром в сильном течении возникают вихри, которые, отрываясь от цилиндра, вызывают его колебания. Кроме того, аппарат ИТР устанавливается на трос с помощью направляющих роликов так, что он касается троса на сегментах окружностей 3 роликов: верхнего и нижнего направляющих роликов, а также шкива электропривода в центре. Трос натянут вертикально под тяжестью груза, который сам может колебаться, как маятник, под влиянием внутренних волн.

**Таблица 1.** Затраты электроэнергии на увеличение плавучести поплавка APEX при подъеме с глубины 800 м по данным (<http://runt.ocean.washington.edu/swift/JES-ApexSbe-energy-budget/node2.html>)

Внешнее давление, бар	Объем перекачиваемого балласта, мл	Затраты электроэнергии	
		Дж	Вт час
80	31	1135	0.315
45	44	1260	0.350
5	66	1339	0.372
0	16	310	0.086
Итого	157	4044	1.122

Трос может вибрировать, как струна, которую дергают за нижний конец. Колебания и вибрация троса воздействуют на аппарат ИТР, который испытывает сложную качку, например, конусообразную. Колебания аппарата происходят в основном в диапазоне частот 10–0.1 Гц. Низкочастотные колебания частично удавалось учитывать при измерениях скорости с помощью ADCP TRDI DVS благодаря наличию в нем двухосевого инклинометра и компаса с частотой опроса 15 Гц. Однако этот измерительный прибор больше не производится. Ближайший аналог, Nortek Aquadopp HR Profiler, поддерживает частоту измерений 8 Гц. Этого не вполне достаточно для выделения высокочастотных колебаний носителя.

По вышеназванным причинам целесообразно отказаться от вертикального расположения носителя по схеме ИТР и вместо этого воспользоваться схемой горизонтального расположения аппарата, подобной Cyclesonde. Причем подвес носителя на тросе должен быть максимально свободным, то есть, по возможности, без постоянного тесного контакта деталей аппарата с тросом. Это возвращает нас к технологии аппарата с переменной плавучестью, который стабилизирован гидродинамически в потоке воды. В таком случае трос будет проходить свободно через каретку на раме носителя и, следовательно, его колебания под воздействием вибрации троса должны уменьшаться.

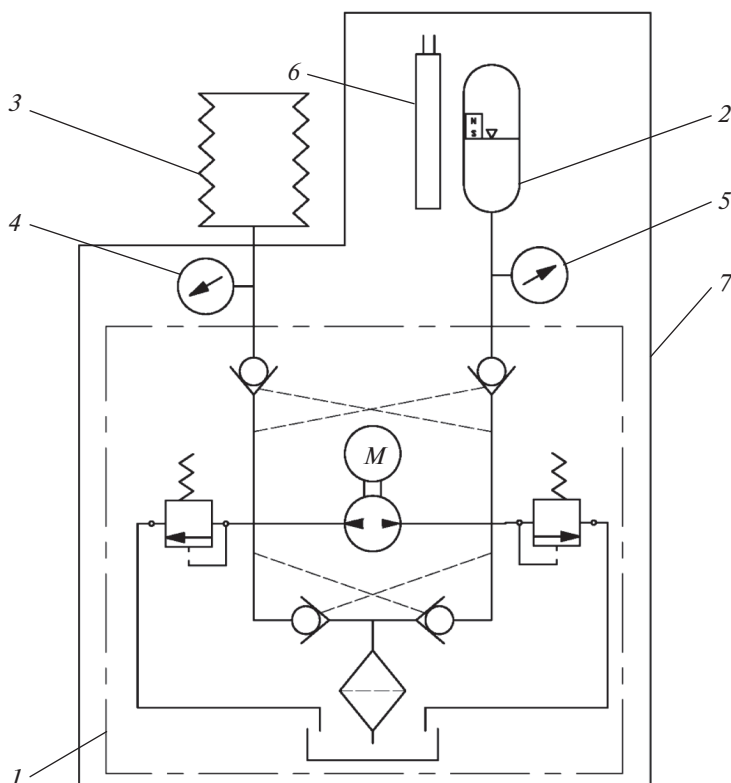
Сравним энергетические затраты на перемещение аппаратов с электроприводом типа Аквалог и буйв-профиломеров АРГО с системой изменения плавучести. В заякоренном мобильном профилографе Аквалог [6] электромеханический привод обеспечивает вертикальное перемещение аппарата по ходовому тросу (буйрепу) буйковой станции за счет вращения приводного ролика, взаимодействующего с поверхностью ходового троса. Тяговое усилие привода достигает 30–40 Н, что позволяет аппарату перемещаться вверх-вниз по тросу при скорости набегающего течения до 0.6–0.7 м/с. Потребляемая аппаратом мощность растет с увеличением скорости движения носителя относительно воды  $V$  пропорционально  $V^3$  [8], но при  $V \leq 0.2$  м/с не превышает 3–4 Вт. В условиях слабых течений типичная скорость вертикального движения носителя равна 0.2 м/с, а затраты электроэнергии на его перемещение растут ли-

нейно с увеличением пройденного пути: для подъема с глубины 100 м до приповерхностного слоя они составляют минимум 0.25–0.3 Вт ч, а с глубины 800 м – 2–2.4 Вт ч. Свободно дрейфующие поплавки APEX типа АРГО перемещаются вверх-вниз между батиметрией и поверхностью моря благодаря изменяемой плавучести. Затраты электроэнергии на подъем дрейфующего поплавка с изменяемой плавучестью APEX с глубины 800 м равны 1.1–1.2 Вт ч (таблица 1). Таким образом, при достаточно глубоком зондировании эффективность системы плавучести (без учета трения при касании троса), по сравнению с электроприводной системой, оказывается вдвое выше.

### 3. СИСТЕМА ПЛАВУЧЕСТИ ЗОНДА

Система плавучести определяет массогабаритные характеристики аппарата. Например, длину прочного корпуса буйв-профиломера АРГО задает в основном длина одноцилиндрового гидравлического поршневого насоса с выдвинутым штоком. Объем насоса буйв АРГО составляет примерно 200 см<sup>3</sup>, что для аппарата, перемещающегося по тросу, было бы недостаточно, как показывает опыт использования аппарата Cyclesonde, у которого первоначально объем внешней расширительной емкости (пузыря) составлял 400 см<sup>3</sup>, но позже был увеличен до 600 см<sup>3</sup>. Поршневой гидравлический насос объема 600 см<sup>3</sup> был бы слишком громоздким и тяжелым для разрабатываемого нами подводного зонда. Поэтому было решено использовать гидравлический шестеренчатый насос высокого давления не менее 8 МПа. При этом насос может быть низкого расхода в пределах 1–10 см<sup>3</sup>/с, но реверсивным, обеспечивающим перекачку рабочей жидкости в наружную расширительную емкость и обратно в прочный корпус.

Однако шестеренчатые насосы высокого давления, как правило, не могут начать перекачку, если нет давления жидкости во входной магистрали. По этой причине в некоторых подводных аппаратах системы плавучести дополняют стартовым насосом низкого давления. Нами предложена гидравлическая схема (рис. 2) без контура предварительной подкачки рабочей жидкости на стороне всасывания из внутреннего резервуара в



**Рис. 2.** Гидравлическая схема автоматического подледного зонда (обозначения по ГОСТу [3]): 1 – гидроагрегат, включающая насос с мотором (обозначен буквой М), предохранительные и запорные клапаны, фильтр, слив, 2 – пневмогидроаккумулятор, 3 – наружная расширительная емкость, 4 – датчик высокого давления, 5 – датчик низкого давления, 6 – датчик положения поршня, 7 – прочный корпус.

шестеренчатый насос. В качестве внутреннего резервуара рабочей жидкости применен пневмогидроаккумулятор емкостью 800 см<sup>3</sup>, изготовленный из хонингованной тонкостенной трубы, выдерживающий внутреннее давление до 0.6 МПа. За счет давления воздуха в пневмогидроаккумуляторе создается напор рабочей жидкости в магистрали низкого давления.

В состав системы плавучести входят следующие основные части (рис. 2):

- гидроагрегат, включая гидравлический насос;
- пневмогидроаккумулятор;
- гидравлическая магистраль высокого давления;
- гидравлическая магистраль низкого давления;
- наружная расширительная емкость.

Современные гидроагрегаты, пригодные по своим характеристикам для разрабатываемого зонда, представляют собой компактные сборки, включающие в себя:

- мотор постоянного тока,
- реверсивный шестеренчатый насос,
- вспомогательный резервуар для рабочей жидкости,
- фильтр рабочей жидкости,

- предохранительные клапаны, работающие при превышении порогового значения напора рабочей жидкости, в нашем случае 10 МПа,

- гидравлические замки, перекрывающие движение жидкости в одном из направлений,

- монтажную плиту.

В монтажной плите имеются гидравлические магистрали и отверстия для установки мотора и насоса. На монтажной плите на одной стороне расположен мотор, а с противоположной стороны – насос внутри резервуара с рабочей жидкостью, который герметично крепится к монтажной плите. При такой компоновке вал насоса проходит насквозь через отверстие в монтажной плите и соединен с валом мотора с помощью муфты. Габариты гидроагрегата зависят не только от размеров резервуара, длины электропривода, но также от конструкций клапанов и способа их монтажа. В нашем случае как предохранительные клапаны, так и гидравлические замки, управляемые давлением рабочей жидкости (см. рис. 2), встроены в монтажную плиту. Также использованы элементы защиты и резервирования с целью обеспечения надежности.

Управление расходом рабочей жидкости осуществляется с высокой точностью (не хуже 2 см<sup>3</sup>)

с помощью линейки датчиков Холла, регистрирующих положение поршня во внутреннем резервуаре — пневмогидроаккумуляторе. Для дублирования контроля расхода используется датчик низкого давления, установленный во внутреннем резервуаре; время отклика датчика — менее 0.2 мс и точность —  $\pm 0.25\%$  от полной шкалы. Точные данные об объеме жидкости во внутреннем резервуаре, а, значит, и в наружной расширительной емкости необходимы для контроля баланса сил плавучести и силы тяжести зонда, если нужно, чтобы он вышел на заданный горизонт глубины, плотность воды на котором может быть заранее известна. Второй датчик давления смонтирован на штуцере, который соединяет насос с магистралью высокого давления, ведущей к наружной расширительной емкости. Фактически второй датчик давления измеряет гидростатическое давление, контролируя глубину погружения.

Наружная расширительная емкость имеет шарообразную форму, она изготовлена из маслостойкой резины. В качестве рабочей жидкости используется масло для всесезонной эксплуатации в гидроприводах и гидравлических системах машин, которое имеет вязкостные, антиокислительные, противоизносные, антикоррозионные, низкотемпературные и антипенные свойства, в том числе, кинематическую вязкость при  $50^{\circ}\text{C}$  не менее  $10.0 \text{ м}^2/\text{с}$ , при  $-40^{\circ}\text{C}$  не более  $1500 \text{ м}^2/\text{с}$ , температуру застывания не выше  $-60^{\circ}\text{C}$ , индекс вязкости не менее 160, плотность при  $20^{\circ}\text{C}$  не более  $865 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Система плавучести экспериментального образца зонда обеспечивает следующие характеристики по назначению:

- изменение объема носителя в диапазоне  $-4 \times 10^{-4} - 4 \times 10^{-4} \text{ м}^3$ ,
- погрешность изменения объема носителя  $2 \times 10^{-6} \text{ м}^3$ ,
- диапазон скорости изменения объема носителя  $0 - 8 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ ,
- выход на рабочий режим перекачки рабочей жидкости со старта 6 с, выключение 0.1 с.

#### 4. КОНСТРУКЦИЯ НОСИТЕЛЯ С ПЕРЕМЕННОЙ ПЛАВУЧЕСТЬЮ

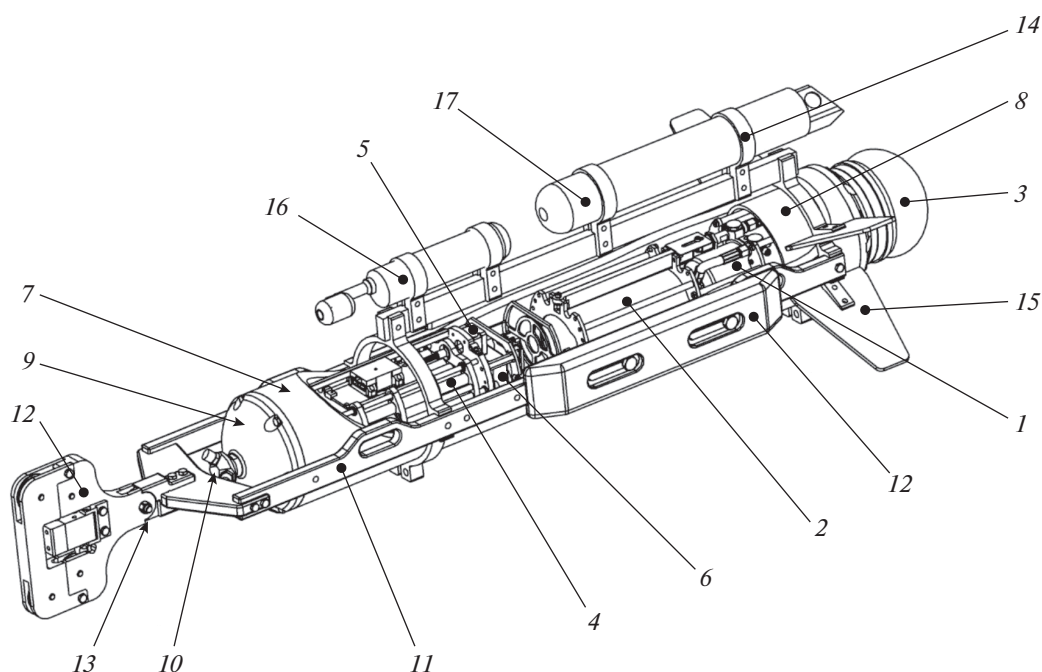
Оборудование носителя размещено в цилиндрическом корпусе (рис. 3). Корпус заглушен полусферическими крышками из полиацетали марки ПОМ-С. Длина корпуса с крышками составляет 1.2 м, диаметр 0.2 м. Корпус имеет двухслойную конструкцию: в герметичный контейнер из ПОМ-С вставлена тонкостенная гильза из алюминиевого сплава, что обеспечивает прочность, необходимую для погружения до глубины 2000 м. На передней крышке смонтированы разъемы для подключения океанологических измери-

тельных приборов: ADCP, CTD-зонда, а также для подключения модема подводной связи.

На задней крышке корпуса установлена наружная расширительная емкость (рис. 3). При перекачке балласта в системе плавучести происходит перемещение как центра массы, так и центра вытеснения зонда (точки приложения архимедовой силы). При погружении на нижний горизонт наружная емкость должна быть пустой, а зонд должен находиться в горизонтальном положении в устойчивом равновесии, что достигается путем совмещения положения центра вытеснения и центра массы на продольной оси зонда. Отметим, что для устойчивости центр вытеснения всегда должен располагаться над центром массы. Для подъема нужно придать зонду положительную плавучесть, перекачав рабочую жидкость в наружную расширительную емкость. При этом как центр масс, так и центр вытеснения смещаются подальше от ходового троса. Однако это смещение происходит на разную величину. Также при подъеме появляется составляющая силы гидродинамического сопротивления, направленная вниз, что может приводить к дифференту аппарата. По достижении верхнего горизонта зондирования рабочая жидкость перекачивается из наружной расширительной емкости во внутренний резервуар носителя, поэтому центры масс и вытеснения перемещаются ближе к ходовому тросу. При погружении возникает составляющая силы гидродинамического сопротивления, направленная вверх. Желательно, чтобы аппарат погружался и всплывал с небольшой скоростью, поскольку вертикальная составляющая силы гидродинамического сопротивления пропорциональна квадрату скорости движения аппарата относительно воды.

Для компенсации наклона зонда в вертикальной плоскости в носителе предусмотрена система дифферента, позволяющая быстро перемещать аккумуляторную батарею массой примерно 2.5 кг (рис. 3) параллельно продольной оси аппарата. Прецизионное линейное перемещение батареи в пределах 0.1 м осуществляется с помощью шагового актуатора. Точность смещения и скорость перемещения составляют порядка  $10^{-3} \text{ м}$  и  $10^{-2} \text{ м}/\text{с}$  соответственно. Чтобы наклон зонда не зависел от наклона троса, в конструкции каретки рамы носителя предусмотрен поворотный узел с консолью из ПОМ-С (рис. 3). Этот узел также необходим при постановке и подъеме носителя на лед из майны после завершения миссии. В последнем случае линейный актуатор перемещает батарею в предельное положение ближе к хвостовой части так, что носитель принимает вертикальное положение, повиснув на поворотном узле.

Батарея представляет собой сборку литий-ионных аккумуляторов и имеет номинальное напряжение 24.6 В и емкость около 700 Вт ч. Электронный модуль управления аппаратом распола-



**Рис. 3.** Чертеж общего вида подводного зонда: 1 – насос, 2 – пневмогидроаккумулятор, 3 – наружная расширительная емкость, 4 – батарея, 5 – мотор линейного актуатора, 6 – место установки электронного модуля, 7 – герметичная оболочка корпуса, 8 – прочная гильза корпуса, 9 – крышка корпуса, 10 – узел с подводными разъемами, 11 – рама, 12 – каретка, 13 – поворотный узел, 14 – хомут, 15 – стабилизаторы, 16 – CTD, 17 – ADCP.

гается между внутренним резервуаром с рабочей жидкостью и батареей. Этот модуль, помимо своей основной функции управления работой носителя, осуществляет обмен командами и данными с океанологическими измерительными приборами (см. статью [4]).

Океанологические измерительные приборы, в данном случае RBR CTD и Nortek Aquadopp HR ADCP, установлены снаружи на раме над носителем так, как показано на рис. 3. Оба прибора имеют небольшие габариты и массу в воде (использован Aquadopp HR ADCP в безбатарейном укороченном корпусе). Оба подключены к системе управления зондом. CTD RBRbrevio обеспечивает возможность измерений температуры, электропроводности и давления с частотой не ниже 4 Гц. Стоит отметить, что, в дальнейшем используя CTD RBRconcerto, можно будет дополнительно подсоединять еще два датчика из тех, что предлагаются производителем (см. <https://rbr-global.com/products/standard-loggers/rbrduo-ct>). ADCP в горизонтальном положении может проводить измерения при угле наклона прибора до 30°. Измерительная головка бокового обзора оснащена тремя трансдюсерами. ADCP установлен так, что акустические лучи направлены вверх под углами 25° к вертикальной оси. ADCP измеряет вертикальный профиль скорости течения над зондом на удалении до 4 м, при вертикальном разрешении 0.03 м. Измерения проводятся с частотой 8 Гц на несущей частоте 2 МГц. Обработка этих дан-

ных совместно с данными датчика давления RBR CTD позволяет определить заглублиение нижней кромки льда, построить распределение скорости течения и эхограмму в координатах глубина–время. Кроме того, совместная обработка данных измерений вертикального распределения скорости течения и плотности воды позволяет рассчитать значения числа Ричардсона и коэффициента вертикального турбулентного обмена массой [12].

Герметичный корпус носителя закреплен на раме с помощью двух хомутов. Рама и хомуты изготовлены из высокомолекулярного полиэтилена. Зонд полностью коррозионностойкий, весь крепеж сделан из полиамида и нержавеющей стали марки А4 (316). На боковые продольные рейки рамы устанавливаются накладки-плавучести из синтактика так, что с их помощью можно регулировать положение центра масс. Сзади на раме устанавливается оперение для стабилизации зонда в горизонтальном течении. Спереди на дышле рамы имеется кронштейн с кареткой для навешивания на ходовой трос. В каретке установлены два ролика, которые уменьшают трение при касании о трос. В целом зонд вместе с океанологическими измерительными приборами весит не более 60 кг в воздухе и имеет плавучесть, близкую к нейтральной в морской воде. В варианте использования прибора на мелкой воде до глубины 300 м допускается использование однослойного корпуса без упрочняющей гильзы, что позволяет облегчить зонд примерно на 10 кг.

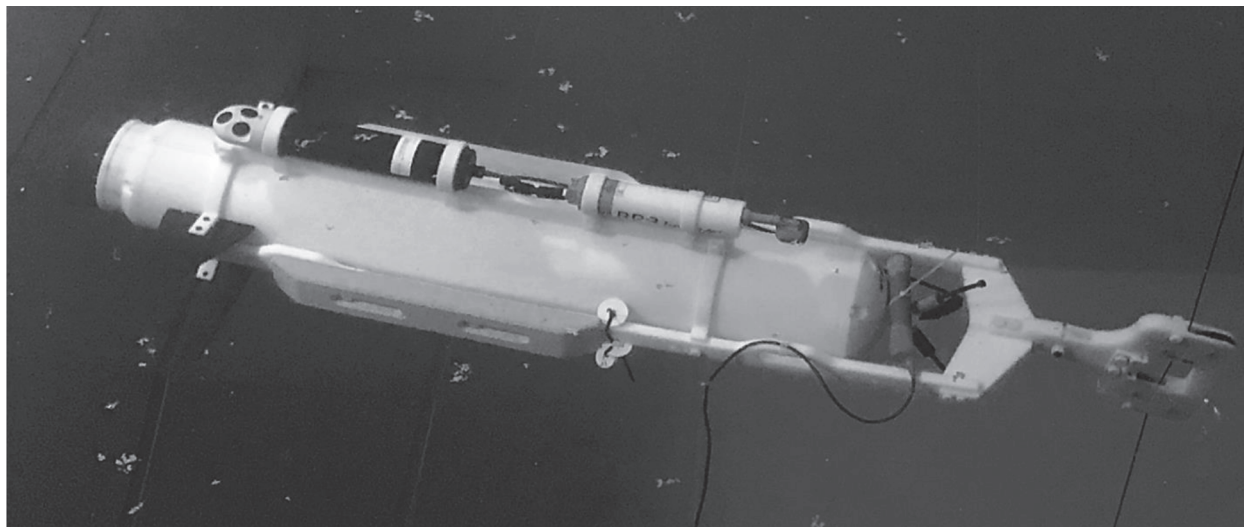


Рис. 4. Фото автоматического подледного зонда в испытательном бассейне.

В июне–июле 2020 г. были проведены предварительные испытания изделия (рис. 4) в испытательном бассейне и полунатурные испытания в морских условиях. При подъеме с горизонта 55 м было перекачено  $600 \text{ см}^3$  рабочей жидкости в наружную расширительную емкость за примерно 370 с. За это время аппарат поднялся до горизонта 45 м, а далее свободно всплывал к поверхности моря. При перекачке рабочей жидкости ток в электрической цепи гидроагрегата достигал 450 мА. Общие затраты энергии на время выполнения цикла погружение/всплытие, работу системы дифферентовки, а также работу зонда СТД составили около 3.8 Вт ч. Скорость перемещения зонда вниз составила 0.11 м/с, вверх – 0.05 м/с. Качение аппарата было незначительным в пределах  $5^\circ$ . По результатам испытаний определены задачи по доработке изделия.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время большая часть данных о течениях в Мировом океане и его морях собирается с помощью ADCP. Этот подход оказался наиболее эффективным по величине затрат на единицу объема получаемой информации. Создание носителя ADCP, обеспечивающего в полной мере применение акустического доплеровского метода, – важная задача развития морской техники. Данное исследование отчасти направлено на улучшение отношения сигнал/шум и на повышение вертикального разрешения подводных акустических измерений. Экспериментальный образец автоматического подледного аппарата разрабатывался как совместный носитель ADCP и СТД-зонда. В конструкции нового носителя удалось избавиться от нескольких недостатков предшествующих разработок аналогичной по назначению океанологической техники. В отличие от

аппарата Cyclesonde, созданного в 1970–80-х гг., разработанный нами зонд имеет ресурс автономной работы на порядок больший, а также на порядок большую рабочую глубину. В отличие от аппарата ИТР разработки начала 2000-х гг. наш носитель устойчив в течении и при наличии хвостового обтекателя не подвержен колебаниям из-за отрыва вихрей при обтекании потоком воды.

Применение ADCP на автоматическом подледном носителе дает возможность квази-непрерывно регистрировать поверхность раздела лед/вода в течение нескольких месяцев, что дает определенную надежду на оптимизацию состава ледовых измерительных систем в будущем. В свою очередь, использование СТД-зонда на разработанном носителе позволит регистрировать долговременные изменения термохалинной структуры вод в Арктике и оценивать текущие значения тепло- и солезапаса в слое атлантических вод и выше него. Разработанный нами зонд будет полезен также для регистрации тонкой структуры процессов перемешивания вод, а также для обнаружения звукорассеивающих слоев в водной толще. Заложенные в зонде возможности позволят применять его не только для подледных исследований, но и для глубоководных. В этом случае аппарат может использоваться в составе автономной приповерхностной буйковой станции. Таким образом, разработана конструкция подводного зонда-профилографа нового поколения, обеспечивающего долговременные и потенциально наилучшие по точности измерения вертикального профиля скорости течения, а также профилей температуры, солености, плотности и, опционально, других параметров водной среды.

**Источник финансирования.** Работа выполнена в рамках государственного задания № 0149-2019-0011 и гранта РФФИ № 18-05-60124\_Арктика.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балакин Р.А., Вилков Г.И. Исследование акустических свойств морского льда, покрытого снегом // Лед и Снег. 2018. Т. 58. № 3. С. 387–395. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-3-387-395>
2. ГОСТ 19.701-90 ЕСПД. Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. Обозначения условные и правила выполнения. Москва: Издательство стандартов, 1991. 26 с.
3. ГОСТ 2.781-96 ЕСКД. Обозначения условные графические. Аппараты гидравлические и пневматические, устройства управления и приборы контрольно-измерительные. Москва: Издательство стандартов, 2004. Переиздание. 16 с.
4. Кочетов О.Ю., Волков С.В. и др. Система управления автоматического подледного зонда // Океанология. 2021 (сдана в печать).
5. Мотыжев С.В., Лунев Е.Г., Толстошеев А.П. Опыт применения автономных дрейфтеров в системе наблюдений ледовых полей и верхнего слоя океана в Арктике // Морской гидрофизический журн. 2017. № 2. С. 54–68.
6. Островский А.Г., Зацепин А.Г., Соловьёв В.А. и др. Автономный мобильный аппаратно-программный комплекс вертикального зондирования морской среды на заякоренной буйковой станции // Океанология. 2013. Т. 53. № 2. С. 259–268.
7. Татаренко Е.И., Смирнов В.Д., Купер В.Я., Рубцов М.Г. Система для изменения плавучести подводного аппарата // Патент на изобретение. ФИПС РФ. 2016. № RU 2602640 С1. Дата начала отсчета срока действия патента 29.04.2015. Опубликовано: 20.11.2016. Бюл. № 32.
8. Carlson D.F., Ostrovskii A., Kebkal K., Gildor H. Moored automatic mobile profilers and their applications // In: Oren, G. (Ed.), *Advances in Marine Robotics*. Lambert Academic Publishing. 2013. P. 169–206, ISBN: 978-3-659-41689-7.
9. Krishfield R., Toole J., Proshutinsky A., Timmermans M.-L. Automated ice-tethered profilers for seawater observations under pack ice in all seasons // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2008. V. 25. № 11. P. 2091–2105. <https://doi.org/10.1175/2008JTECH0587.1>
10. Magnell B., Ivanov L., Siegel E. Measurements of ice parameters in the Beaufort Sea using the Nortek AWAC acoustic Doppler current profiler // *Oceans 2010 MTS/IEEE Seattle*, Seattle, WA. 2010. P. 1–8. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2010.5664016>
11. Melling H. Sound scattering from sea ice: Aspects relevant to ice-draft profiling by sonar // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 1998. V. 15. № 4. P. 1023–1034.
12. Podymov O., Zatsepin A., Kubryakov A., Ostrovskii A. Seasonal and interannual variability of vertical turbulent exchange coefficient in the Black Sea pycnocline in 2013–2016 and its relation to variability of mean kinetic energy of surface currents // *Ocean Dynamics*. 2020. V. 70. P. 199–211. <https://doi.org/10.1007/s10236-019-01331-w>
13. Shcherbina A.Y., Rudnick D.L., Talley L.D. Ice-draft profiling from bottom-mounted ADCP data // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2004. V. 22. № 8. P. 1249–1266.
14. Strass V. Measuring sea ice draft and coverage with moored upward looking sonars // *Deep-Sea Research*. 1998. V. 45. № 4–5. P. 795–818. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(97\)00065-4](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(97)00065-4)
15. Toole J.M., Krishfield R.A., Timmermans M.-L., Proshutinsky A. The ice-tethered profiler: Argo of the Arctic // *Oceanography*. 2011. V. 24. № 3. P. 126–135. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2011.64>
16. Van Leer J. An automatic Arctic profiling system for oceanography under ice // *OCEANS '85 – Ocean Engineering and the Environment*, San Diego, CA, USA, 1985. P. 433–436.
17. Van Leer J., Düing W., Erath R., Kennelly E., Speidel A. The cyclesonde: an unattended vertical profiler for scalar and vector quantities in the upper ocean // *Deep-Sea Research*. 1974. V. 21. № 5. P. 385–386. [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(74\)90043-6](https://doi.org/10.1016/0011-7471(74)90043-6)

## Automatic Profiling System for under Ice Measurements

A. G. Ostrovskii<sup>a, #</sup>, A. G. Zatsepin<sup>a</sup>, D. A. Shvoev<sup>a</sup>,  
S. V. Volkov<sup>a, b</sup>, O. Yu. Kochetov<sup>a</sup>, V. M. Olshanskiy<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>b</sup>Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>#</sup>e-mail: osasha@ocean.ru

The article is devoted to the development of an autonomous profiling system for measurements of the water environment under ice. The system moves up and down in the water column along a cable with a load at the lower end, which is lowered into a lane in the ice. The system carrier is designed for transporting an acoustic Doppler current profiler and a probe for salinity, temperature and pressure. The system will be useful for long-term measurements of vertical profiles of the current speed and of the marine environment parameters, as well as for measurements of the ice thickness. The article describes in detail the structure and operation of the system. The hydraulic scheme of the carrier buoyancy system is presented.

**Keywords:** Arctic, autonomous profiling apparatus, variable buoyancy, acoustic Doppler current profiler, ice thickness