

## СОВРЕМЕННЫЕ ДРЕЙФУЮЩИЕ РОБОТИЗИРОВАННЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОНТАКТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АРКТИЧЕСКОГО БАССЕЙНА

**Писарев С.В.**

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва,  
Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: [pisarev@ocean.ru](mailto:pisarev@ocean.ru)*

Статья поступила в редакцию 05.10.2019, одобрена к печати 21.11.2019

Дается описание всех имеющихся автоматических измерительных устройств, которые сконструированы для выполнения контактных измерений характеристик льда и океана с дрейфующих ледяных полей в условиях низких температур. Все рассматриваемые устройства работают по заданным программам, передают результаты измерений в береговые центры в реальном масштабе времени, имеют GPS навигацию, не являются опытными образцами или действующими макетами, а изготавливаются поштучно или малыми сериями. Кроме того, все эти типы устройств уже производили успешные измерения в Арктике в течении года и более. Приводится описание устройств не только по сведениям из специальной литературы, но и на основе личного практического многолетнего опыта автора по работе с этой измерительной техникой в Арктическом бассейне.

**Ключевые слова:** Арктически бассейн, И.Д. Папанин, морской дрейфующий лед, дрейфующее со льдом автономное устройство

### **Введение**

Круглогодичный ледяной покров – это то, чем принципиально отличается Арктический бассейн (глубоководная часть Северного Ледовитого океана) от других акваторий Мирового океана с точки зрения выполнения натуральных измерений. И хотя обоснованно считается, что наличие льда, в большинстве случаев, препятствует выполнению контактных измерений, тот же лед дает и определенные преимущества исследователям океана.

Самая очевидная трудность для выполнения измерений в Арктическом бассейне (АБ) – это достижение определенных, интересующих исследователей, координат даже на относительно небольшом расстоянии от ледяной кромки. Это нельзя сделать с помощью обычного научно-исследовательского судна. Требуется применение или ледокола, или подводной лодки, или специально подготовленного летательного аппарата – самолета или вертолета. Следует добавить, что имеется небольшой опыт успешных измерений с использованием дирижаблей в 1930-е годы

и судна на воздушной подушке в 2014–2015 гг. (Kristoffersen et al., 2016), а также в РФ имеются планы использования экранопланов. Любая из перечисленных выше транспортных или измерительных платформ значительно дороже в эксплуатации, чем судно,двигающееся по открытой воде. Кроме того, даже самый мощный на сегодня научно-исследовательский ледокол «Поларштерн» зачастую не в состоянии, с разумными временными затратами, преодолеть тяжелые льды для того, чтобы выйти в планируемую точку океана. Этим объясняет тот факт, что и в XXI веке, так же как и на заре измерений океана с ледоколов в первой трети XX века, океанографические разрезы в АБ представляют собой не относительно прямые линии, которые обычны для открытого океана, а причудливые ломанные (Fer et al., 2004; Rabe et al., 2007). Конечно, российские атомные ледоколы гораздо мощнее ледокола «Поларштерн» и, используя их, можно достигать любых частей АБ по относительно прямым маршрутам. Однако мощные ледоколы РФ не имеют штатного научного оборудования и, по ряду причин, научные измерения на них выполняются крайне редко. Самолеты и даже вертолеты не могут приземляться на лед в любых заданных координатах даже светлым полярным днем, ну а рейды подводных лодок подо льдом АБ с научными целями хоть и имели место в Великобритании в начале XX века и в США в 1993–1999 гг., но не получили продолжения (SCICEX, 2019).

Если отойти от тактики активных измерений, когда надо безусловно попасть в строго определенные координаты АБ и перейти к пассивному подходу, когда исследователи заранее соглашаются с тем, что тот или иной район бассейна они достигнут с определенной вероятностью в свободном дрейфе вместе со льдом, то сразу проявляются преимущества дрейфующих ледяных измерительных платформ. Эти преимущества – практическое отсутствие «шума» от волн в результатах измерений и относительно медленный, по сравнению с открытым океаном, ветровой дрейф.

Первыми научными измерениями на морском дрейфующем льду следует считать работы голландцев на юго-западе Карского моря в 1882 г. По программе Первого Международного Полярного Года (МПГ) Голландия собиралась открыть полярную станцию на острове Диксон при входе в Енисейский залив. Для доставки грузов и оборудования парусно-моторное судно «Варна» вышло из Амстердама в июле 1882 г. Уже в конце августа вблизи пролива Карские Ворота судно было заблокировано льдами и вместе с ними внесено в Карское море. 27 сентября 1882 г. были начаты научные измерения на судне, а несколько позже, из-за угрозы разрушения судна льдами, часть экспедиции вместе с научным оборудованием и запасами продовольствия переместилась на дрейфующий лед. Там же были начаты метеорологические и астрономические измерения, которые продолжались до августа 1883 г. Заметим, что 24 июля 1883 г. «Варна» затонула. (Андреев и др., 2007). Полученный голландцами опыт организации научных работ на дрейфующем льду в течении года был впоследствии проанализирован и активно использовался при подготовке последующих научных дрейфующих экспедиций на судне «Фрам» в 1893–1896 гг. под руководством Нансена и на станции «Северный Полюс–1» в 1937–1938 гг. под руководством И.Д. Папанина.

Иван Дмитриевич Папанин после того, как в 1936 г. решением Политбюро СССР был назначен руководителем дрейфующей ледовой станции Северный Полюс (СП) (порядковый номер 1 появился только через 13 лет, когда в 1950 г. была высажена СП–2), очень дотошно изучал опыт всех известных к тому времени арктических экспедиций – и успешных, и с трагическим финалом. По его собственному рассказу, он критически перечитывал множество публикаций о дрейфах под руководством Нансена, Де Лонга, Франклина, Кэна, Пэрса (Папанин, 1977). Папанинская подготовка позволила первой в мире научной экспедиции, целенаправленно использовавшей в качестве измерительной платформы дрейфующее ледяное поле, избежать и цинги, и длительных переохлаждений, и множества других трудностей во время беспримерного по уровню личного героизма и новизне полученных научных результатов девятимесячного дрейфа из приполюсного района АБ к южной части восточных берегов Гренландии.

Славная история советских, а затем российских дрейфующих станций с номерами от 1 в 1937 г. до 40 в 2012 г., хорошо известна и подробно описана в отечественной литературе. Результаты всесезонных научных дрейфующих станций США, которые на регулярной основе работали в АБ в период с начала 1950 до начала 1990 гг., известны у нас, пожалуй, только заинтересованным специалистам. Отдельные эксперименты на дрейфующих льдах АБ европейских и канадских коллег, тоже известны только специалистам, но от этого они не менее значительны с научной точки зрения.

Так или иначе, но к концу XX века накопился значительный международный опыт использования ледяных полей в качестве измерительных платформ в АБ. Одновременно, с начала 1990-х годов, в природной среде Арктики стал наблюдаться комплекс изменений, который получил обобщающее название – потепление (АСИА, 2004; Фролов и др., 2008). Очевидное облегчение условий плавания во льдах Арктики, связанное как с потеплением, так и развитием морского транспорта, международные ожидания высокой экономической эффективности освоения арктических природных ресурсов, другие экономические и политические обстоятельства (ANDR, 2004) породили небывалый прежде интерес к этому все еще труднодоступному району Земли. Как часть реакции на этот интерес, в 2007–2009 гг., в год семидесятилетия дрейфа СП–1, был проведен МПГ и появилось большое количество новых инициативных групп, комиссий и комитетов по изучению Арктики и, в частности, развитию систем наблюдений в этом слабоизученном регионе. Одновременно многие развитые страны стали, в том числе, прилагать усилия по изготовлению автоматических и роботизированных измерительных устройств, дрейфующих на ледяных полях. По сути происходила замена обитаемых дрейфующих станций, которые в количестве от одной до пяти, ежегодно поддерживали в АБ СССР и США во второй половине XX века, на десятки автономных автоматических станций с разной национальной принадлежностью.

## Комплексные измерительные системы для Арктики

Одним из общих декларируемых на сегодня подходов к измерениям в части Арктики – Северном Ледовитом океане (СЛО) как собственно и в других районах Мирового Океана, является создание комплексных систем наблюдений (рис. 1).

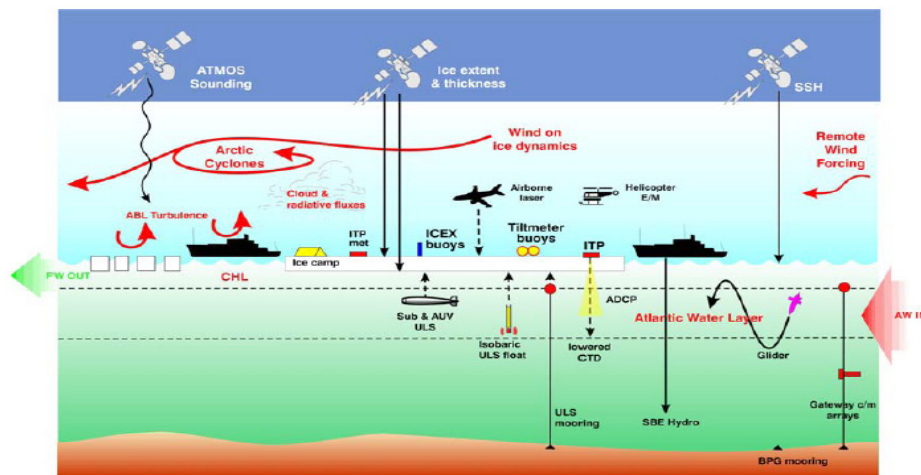


Рис. 1. Схема измерений в Арктике, необходимых для диагноза современного и прогноза будущего состояния морского дрейфующего льда, в рамках международного проекта Integrated Arctic Ocean Observing System (IAOOS) – комплексная система наблюдений Северного Ледовитого океана. Рисунок взят из (Dickson, 2006)

В состав новых измерительных устройств, которые в настоящее время стали использоваться для создания комплексных измерительных систем в Арктике, конечно, входят не только те, которые дрейфуют вместе со льдом. Много новых контактных измерителей используются с борта ледокольных судов. Так, например, в начавшемся 7 октября 2019 годовом дрейфе международного проекта MO-SAIC на вмороженном ледоколе «Поларштерн» (MOSAIC, 2019) планируется использовать зонд, способный, как утверждают конструкторы зонда, определять в автоматическом режиме порядка 80% известных видов планктона АБ. Цель запланированного использования этого зонда весьма прозаична. Обоснованно предполагается, что при сжатиях ледокола будет трудно поддерживать у борта отверстие во льду таких больших размеров, которые необходимы для работы с более традиционным комплексом для вылова планктона Multinet, – системой из нескольких биологических сеток. Новый зонд габаритно меньше сеток, и поэтому возможна работа более легкими лебедками и через меньшее отверстие. Хотя работы с палуб ледоколов имеют множество особенностей, связанных с реализацией в Арктике, тем ни менее, они используют те же технические средства, что и в других районах океана при работах с палуб судов без усиленных ледовых классов. Поэтому работы с палуб не являются исключительно «арктическими» и в данной статье современный прогресс в области таких измерений рассматриваться не будет.

Другим традиционным элементом контактных систем наблюдений в океане являются донные буйковые станции (БС). Для этого типа измерений имеются

современные устройства, применяющиеся только в районах, покрытых льдом. Прежде всего, это сонары (Upper Looking Sonar – ULS), закрепляемые в верхней части притопленных БС и измеряющие из-под воды толщину дрейфующего над станцией льда. Кроме того, автору на практике известны 2 типа подводных лебедок, которые, после того как сонар определил осадку льда, в автоматическом режиме, периодически выпускают вверх океанографический зонд на горизонт примерно 5 м от нижней поверхности льда. Таким образом, удается получить и записать вертикальный профиль температуры, солености и иногда растворенного кислорода в верхних десятках метров подо льдом, с одной стороны, а с другой, – не оторвать верхнюю часть БС в случае дрейфа над станцией толстого льда с глубокой осадкой или айсберга. Еще имеется специальная техника, позволяющая поднимать БС, всплывшие под сплошной ледяной покров. Из-за широты этой проблемы, такие технические средства здесь рассмотрены не будут.

В современных дистанционных спутниковых или авиационных измерениях в Арктике также наблюдается скачкообразный прогресс, однако мы не будем их рассматривать в настоящей статье, поскольку ограничимся контактными устройствами.

Здесь мы рассмотрим только дрейфующие на ледяных полях специфические арктические автоматические измерительные устройства, являющиеся элементами наблюдательных систем. В силу того, что физические характеристики системы лед–океан–атмосфера измерять, на сегодня, электронными устройствами легче, по сравнению, скажем, с определением видового состава планктона или свойствами донных осадков, то основной прогресс достигнут именно в измерениях физических параметров.

Ограничим рассмотрение теми устройствами, которые изготовлены с расчетом на работу в условиях низких температур воздуха и установка которых предусматривается на морском льду. Собственно в этом и состоит арктическая специфика. Кроме того, все эти измерительные устройства работают в автоматическом режиме по заранее заданным программам и передают результаты измерений по системе спутниковой связи на береговые компьютеры в реальном масштабе времени. Все эти устройства имеют стандартную GPS навигацию и, таким образом, определяют свои координаты с точностью 15–25 м. Рассмотрим также не действующие макеты или опытные образцы, которых автор настоящей статьи знает не мало, а устройства, которые в течении хотя бы нескольких месяцев демонстрировали штатную работу и предоставившие в результате новые знания о природной среде.

Еще одним ограничением пусть будет то обстоятельство, что рассматриваемые устройства производят измерения нескольких характеристик льда и водной толщи. Дрейфующие автоматические метеорологические станции или относительно простые буи, дрейфующие на поверхности льда и передающие информацию о своих координатах, атмосферном давлении и иногда еще и о температуре воздуха, рассматриваться не будут. Ну и сразу заметим, что все рассматриваемые далее



устройства уже являются коммерческим продуктом, выпускаемым поштучно или малыми сериями и имеющим гарантийные обязательства перед пользователем. Все перечисленные выше ограничения сводят наше рассмотрение к техническим средствам, начавшим свою работу в Арктике в первое десятилетие XXI века и производящим измерения, главным образом, в АБ – глубоководной части СЛО.

Во всех возможных случаях далее будут даны ссылки на техническое описание устройств, однако сам краткий обзор будет производиться с точки зрения пользователя, а не инженера-конструктора. Поскольку ни один производитель не публикует, как правило, информации о недостатках или неудобствах своего продукта, то это сделает автор настоящей статьи на основании собственного практического опыта использования всех рассматриваемых устройств. Опыт был получен в международных арктических экспедициях на французской шхуне «Тара» летом 2006 и 2013 гг., немецком ледоколе Полярштерн осенью 2003, 2007, 2011, 2015 гг., японском судне «Мирай» осенью 2009 г., и совместной работе экспедиций ИО РАН в приполюсном районе в сезонных зимних дрейфующих экспедициях 2007–2018 гг. вместе с американскими коллегами из Полярного Центра университета штата Вашингтон и французскими коллегами из Университета Сорбонны.

Запас автономного электропитания и механический ресурс всех рассматриваемых здесь устройств всегда превышает их практическую продолжительность измерений. Основная причина прекращения измерений – это разрушение льда, на который техническое средство было изначально установлено. Разрушение происходит или из-за расколов и сжатий, или в результате выноса ледяного поля за пределы СЛО и последующего таяния. Именно поэтому устройства, устанавливаемые в Амеразийской части АБ, как правило, работают дольше, поскольку не выносятся из СЛО, а, влекомые крупномасштабным дрейфом льда, вращаются в круговороте моря Бофорта. Те же устройства, но устанавливаемые где-то в Евразийской части АБ, работают штатно не дольше года, поскольку выносятся Трансарктическим дрейфом в районы к югу от пролива Фрама.

Для уменьшения вероятности деформации льдину ее, по возможности, тщательно выбирают. Алгоритм выбора ледовой платформы для любых рассматриваемых здесь устройств упрощенно выглядит как обнаружение монолитной однородной однолетней или многолетней льдины овальной формы с торосами по периметру. Правильный выбор льдины и, как следствие, продолжительность «жизни» технического средства, в сильной степени зависит от практического опыта работы в Арктике хотя бы одного из участников постановки. Помимо арктического опыта необходим и определенный тренинг по установке каждого устройства. Для персонала, имеющего экспедиционный опыт, установка всех перечисленных ниже технических средств не представляет собой неразрешимую задачу. Но для исключения ошибок, иногда практически необратимых, при установке на лед необходима предварительная многократная имитация процесса установки в теплых комфортных условиях. Это нужно для доведения, хотя бы до полуавтоматизма всех механических операций, а также производства электронных манипуляций с помощью компьютера на завершающем этапе установки.

### Буй для измерения баланса морского льда

Буй для измерения баланса морского льда – Ice Mass Balance Boy (IMBB) имеет наиболее продолжительный период применения в Арктике среди всех рассматриваемых в этой статье устройств. Первый, тогда еще экспериментальный IMBB, был установлен в 1993 г. в море Бофорта в американском дрейфующем лагере «SIMI». Затем был перерыв на 4 года, в которые конструкция буя дорабатывалась. В 1997 г. было установлено 7 буев. Затем в 2000–2002 гг. устанавливалось по 1–2 буя ежегодно. К 2000-м конструкция буя претерпела еще несколько модификаций. В период 2003–2006 гг. устанавливалось по 5–6 буев ежегодно. В 2007 г. – год МПГ – было установлено 10 буев. К началу 2019 г. в Арктике уже отработало 84 буя, в настоящее время продолжает измерения 4 IMBB, установленные в прежние годы.

IMB был разработан USA Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL) – исследовательской и инженерной лабораторией «холодных районов» армии США (Richter-Mende et al., 2006). Позже отработанная конструкция была передана для производства малыми сериями в канадскую компанию MetOcean. IMBB в базовой конфигурации состоит из накопителя контроллера данных Campbell Scientific (модель CR10X), передатчика данных системы Argos, цепочки термисторов YSI и двух акустических датчиков над поверхностью снега и льда, и под водой. Верхний акустический датчик производится компанией Campbell Scientific (модель SR–50). Дешифровка сигнала этого датчика позволяет измерять не только нарастание или таяние льда, но и толщину снега. Нижний, подледный акустический датчик, изготавливается компанией Benthos (модель PSA–916). Дополнительный температурный датчик расположен в воде у нижнего акустического датчика (рис. 3, 4). Устройство снабжено также системой спутниковой навигации GPS, датчиком температуры воздуха и барометром компании Vaisala (используют различные модели PTB220A, PTB101B, PTB210A). IMBB измеряет и передает в заранее

запрограммированный момент времени на береговой компьютер данные о своем положении, температуре и давлении атмосферы, подледной температуре воды, температуре во льду, нарастании или таянии льда (рис. 2, 3).

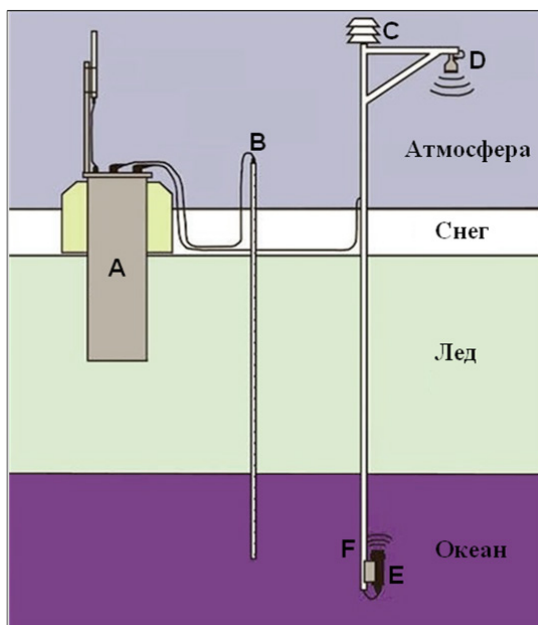


Рис. 2. Схема основных узлов буя для измерения «баланса» морского льда – Ice Mass Balance Boy (IMBB). А – блок опроса датчиков, сбора и передачи данных, GPS, блок батарей во льду, барограф. В – цепочка термисторов. С – датчик температуры воздуха. D – поверхностный акустический датчик. E – подводный акустический датчик. F – датчик температуры воды. Рисунок адаптирован из (Polashenski et al., 2011).



Рис. 3. Внешний вид основных узлов IMBV, расположенных надо льдом. Приполюсной район, 2017 г. Фото автора.

Изменения положения верхней и нижней границы льда относительно изначальной величины при установке IMBV определяется с точностью до 5 мм. Датчики в цепи термисторов располагаются с шагом 10 см по вертикали, а размеры цепи могут быть легко увеличены для измерений температуры не только во льду, но и в нескольких метрах на воздухе и 10–20 м в водной толще. Точность всех температурных измерений не хуже 0.1°C. Давление измеряется до десятых децибара. Частота опроса датчиков и передачи данных, вообще говоря, может быть выбрана любой, но практически выбирается как 4–6 раз в сутки. Не один из 84-х IMBV пока не проработал в Арктике более 1.5 лет. Точная причина прекращения работы не всегда ясна и чаще всего принимается, что отказ произошел из-за механических поломок, связанных с деформацией льда. 3 буйа из 84-х проработали, по столь же неясным причинам, меньше месяца.

Вес, габариты и сложность установки IMBV позволяет, исходя из собственного опыта автора этой статьи, одному подготовленному человеку установить его за 3–4 ч. Но, безусловно, лучше это делать вдвоем или втроем.

Из видимых недостатков основной модели IMBV можно отметить один принципиальный. Желание найти стабильную ледовую платформу для продолжительной работы буйа не позволяет на практике измерять термодинамический цикл молодых, относительно тонких, форм льда. Для того, чтобы преодолеть этот принципиальный недостаток базовой модели IMBV, был сконструирован и с 2009 г. стал использоваться так называемый сезонный IMBV (SIMBV). Этот буй, имея те же датчики, что и IMBV, выполнен в одном корпусе (рис. 4). За счет того, что корпус полый, SIMBV имеет положительную плавучесть и не тонет, когда проламывает тонкий лед или попадает на открытую воду. SIMBV может продолжать измерения и на молодых, тонких формах льда. Из-за значительных габаритов корпуса SIMBV, а также того обстоятельства, что корпус монтируется частями и до их полного соединения электронные блоки буйа могут быть залиты соленой водой, установка SIMBV требует работы минимум двух специалистов.

Не принципиальным недостатком базовой модели IMBV является слабая прочность пластиковых штанг, на которые крепятся акустические датчики



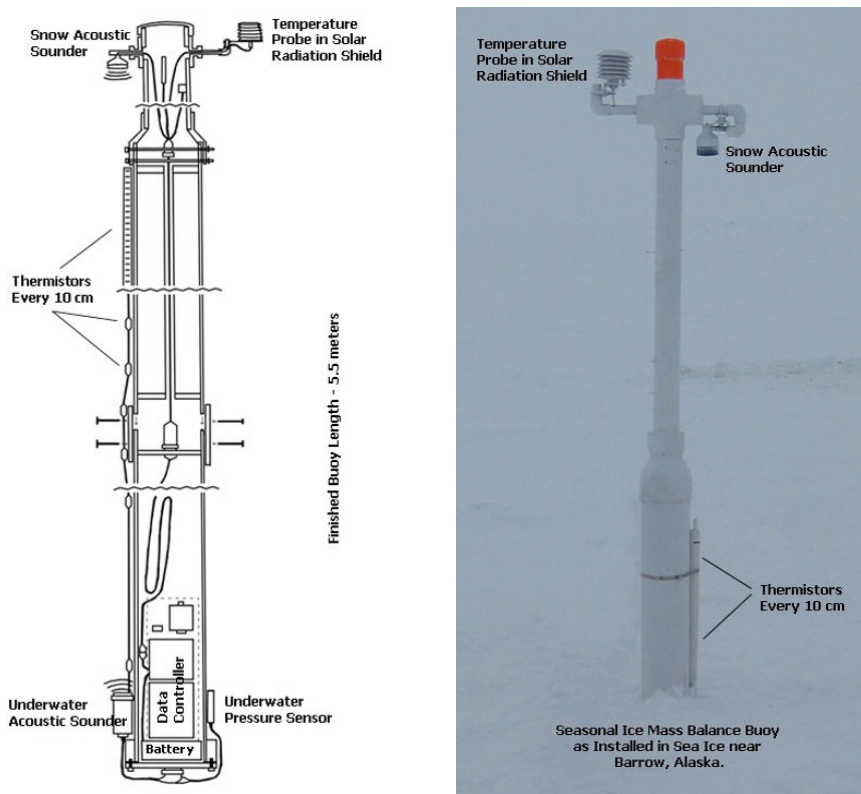


Рис. 4. Схема (слева) и внешний вид надводной части (справа) SIMBB. Snow Acoustic sounder – акустический измеритель толщины снежного покрова; Temperature Probe in Solar Radiation Shield – датчик температуры воздуха в кожухе, защищающем от нагревания от солнца; Thermistors Every 10 cm – термисторная цепочка с расстояниями между термисторами 10 см; Finished Buoy Length – 5.5 meters – длина корпуса буя 5.5 м; Underwater Acoustic Sounder – акустический измеритель изменения толщины льда; Underwater Pressure Sensor – датчик давления воды. Рисунок адаптирован из (Polashenski et al., 2011).

толщины льда и снега (правые вертикальные штанги на рис. 2 и 3), на механическое воздействие. Одна такая штанга была просто погнута сильным ветром на IMBB, установленном рядом с СП–38 в 2010 г. Элементарное усиление г-образной пластиковой трубы IMBB досками, что сделали российские полярники, получив сообщение о нештатной работе буя, вернуло устройство в рабочее состояние. Еще одним недостатком IMBB является не защищенная от встречи с белым медведем конструкция соединительных кабелей. Хотя кабели и вставлены в металлическую оплетку, подобную оплетке гибкого шланга бытового душа, медведь, просто из любопытства, может легко их оторвать от штанг, а также погнуть сами штанги. Возможно именно это событие, безусловно, имеющее не очень высокую вероятность в Центральной Арктике, приводило иногда к прекращению работы IMBB до полной разрядки его аккумуляторов.

Компания MetOcean производит еще несколько интересных буев, имеющих элементы конструкций в точности такие же, как и у IMBB. Это Snow Beacon, PAWS и Solar Beacon. Первый из перечисленных, измеряет толщину снега, вторая – это полярная автоматическая метеорологическая станция. Solar Beacon – тремя пира-

нометрами измеряет приходящую от солнца радиацию, отраженную от снега или льда, а также радиацию в подледном слое океана (MetOcean Systems, 2019). Все упомянутые в данном разделе статьи измерительные устройства компании MetOcean обладают возможностями обратной связи. Иными словами имеется возможность, посплав определенный сигнал через систему спутниковой связи Iridium, менять программу измерений даже тогда, когда устройства уже длительное время дрейфуют автономно где-то в Центральной Арктике.

### **Буй Ice-T**

Буй Ice-T разработан несколькими французскими научно-исследовательскими организациями и успешно применяется в АБ начиная с 2007 г. При наличии навыков экспедиционных работ на льду, один человек может установить Ice-T от начала до конца. Каждый год, в попутном режиме, в АБ устанавливается 1–2 буя Ice-T, причем любыми экспедициями, не обязательно французскими. Средняя продолжительность работы Ice-T – 6 месяцев.

Ice-T сконструирован в одном корпусе, имеющем положительную плавучесть. Этот основной корпус имеет высоту около 2 м и диаметр порядка 25 см. Внутри основного корпуса расположены аккумуляторные батареи, блоки GPS, передачи измеренных данных, управляющий компьютер. Для измерения температуры во льду используется термисторная цепочка, расположенная вдоль внешней стенки основного корпуса. Датчики температуры в этой цепочке расположены через 10 см. Для измерения толщины льда служит, как и у IMBB, акустический датчик. На Ice-T акустический датчик закреплен не жестко к штанге, а в верхней части подводного блока Ice-T. Последний представляет собой цилиндр высотой порядка 40 см с электронными платами внутри, к которому прикреплено крыло (рис. 5). Цилиндр вместе с крылом соединен кабелем и силовым тросиком с нижней частью основного корпуса Ice-T. Помимо акустического датчика, на цилиндре закреплены наклономер и датчик давления. По показаниям акустического датчика в конкретный момент времени определяется расстояние до нижней поверхности льда а датчики давления и наклона позволяют определить насколько цилиндр с крылом отклонился от вертикали при дрейфе ледяного поля, на котором установлен конкретный Ice-T буй. Показания всех трех датчиков можно пересчитать в сантиметры нарастания или, наоборот, таяния на нижней поверхности льда. Эта величина определяется бум с точностью 2 см (OPTIMIZM, 2019).

Подводный цилиндр с крылом, остроумно называемый конструкторами устройства «измерителем морских течений для бедных», позволяет оценивать скорость подледных течений. Благодаря перечисленным выше датчикам, в любой момент дрейфа буя Ice-T можно определить скорость дрейфа льдины по данным GPS и отклонение крыла от вертикали. Каждый цилиндр с крылом калибруется после изготовления в бассейне с регулируемым током воды. В результате калибровки получается зависимость между углом отклонения конкретного «крыла»

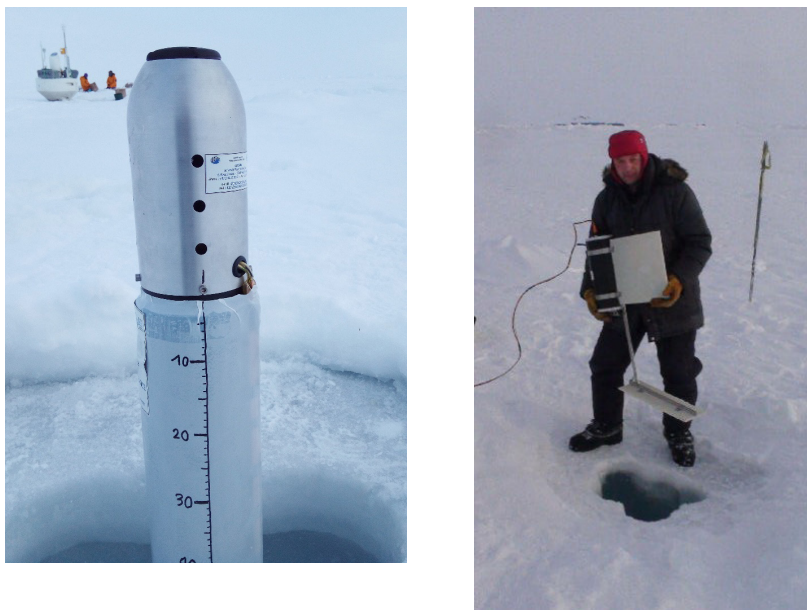


Рис. 5. Внешний вид надо льдом буя Ise-T, который автор установил в приполюсном районе АБ в 2017 г. (слева). Справа – автор устанавливает подводный блок буя Ise-T с крылом в приполюсном районе в 2010 г. Фото автора.

от вертикали и скоростью потока. При дрейфе с ледяным полем по отклонению цилиндра с крылом определяют суммарный вектор скорости течения воды плюс скорость дрейфа. Вычитая дрейф по показаниям GPS, получают оценки течений в подледном слое.

Определенным недостатком Ise-T является то обстоятельство, что для погружения под воду цилиндра с крылом необходимо, строго соблюдая размеры, бурить шнековым буром диаметром 25–30 см три перекрывающие друг друга лунки (рис. 5). Если толщина льда составляет до 1.5 м, это не большая проблема. При большей толщине трудно бурить лед строго вертикально, и отдельные пробуренные отверстия расходятся или сходятся между собой с увеличением глубины бурения. При любом отклонении от вертикали крыло не проходит в лунку и приходится бурить 2–3 дополнительных отверстия, чтобы его погрузить под лед. Чем больше по горизонтальным размерам получается отверстие во льду при установке Ise-T, тем дольше оно смерзается после установки и тем дольше восстанавливается естественный тепловой баланс льда в точке установки Ise-T.

### **Буй для измерения баланса морского льда SIMBA**

Буй для измерения баланса льда SIMBA (Sea Ice Mass Balance Array) изготавливается шотландской ассоциацией по морским наукам и технологиям для мониторинга изменений характеристик морского льда Арктики. Первые устройства такого типа появились в 2012 г. SIMBA позволяет определять нарастание и уменьшение толщины льда, толщину снежного покрова, температуру воздуха–снега–льда и верхнего слоя воды (SAMS, 2019). Все эти параметры определяются

с помощью единственной термисторной цепочки. Согласно заданной заранее программы, электронный блок SIMBA нагревает термисторы, и по скорости их остывания определяется среда (лед или снег или вода или воздух), в которой на конкретный момент времени находится конкретный термистор. Зная размеры цепочки, расстояние между термисторами и начальное расстояние от верхнего подвеса цепочки до снега или льда определяют толщину той или иной среды.

Конструкция буйа отличается исключительной простотой, а его установка на ледяное поле для начала работы доступна широкому кругу участников экспедиций.

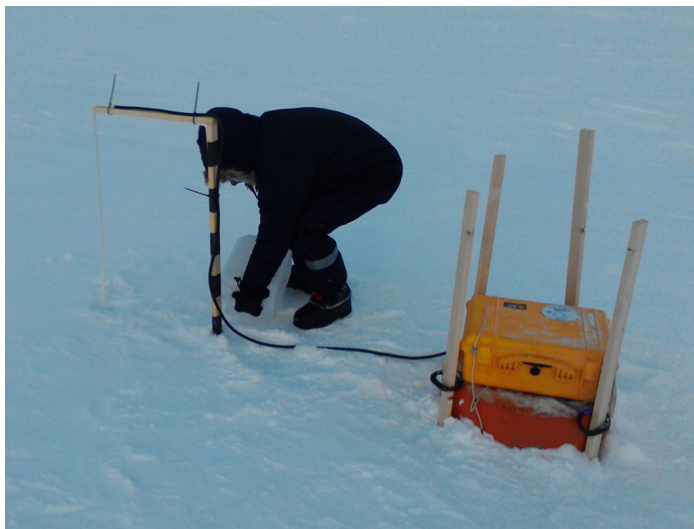


Рис. 6. Автор статьи устанавливает, следуя одной из нескольких методик, буй SIMBA в приполюсном районе АБ в 2015 г.

Фото автора.

При установке требуется пробурить только одно отверстие во льду диаметром всего 5 см. Несмотря на простоту (и дешевизну), электронный блок SIMBA позволяет к уже имеющимся блокам буйа – GPS навигация, связь IRIDIUM, цепочка датчиков температуры, подключать дополнительные датчики и блоки, например, веб-камеру (рис. 6).

Существует несколько методик установки SIMBA и несколько конструкций для подвеса термисторной

цепочки, разные соединительные кабели, разнообразные механические устройства, обеспечивающие, например, плавучесть электронного блока буйа. Поиски наилучшего набора элементов SIMBA продолжается. На рис. 6 желтый ящик справа – электронный и аккумуляторный блок SIMBA. Он установлен на плавучесть красного цвета. При возможном появлении летних снежиц, не полностью герметичный электронный блок должен всплывать на поверхность, при этом скользя вдоль и находясь между четырех деревянных реек. Измерительная термисторная цепочка натянута вертикально с вершины г-образной полосатой штанги благодаря грузу, который присоединен к цепочке и находится под водой.

### **Буй АОФВ, измеряющий тепловые потоки между океаном и льдом – АОФВ**

Autonomous Ocean Flux Boy (АОФВ) – автономный буй, измеряющий потоки тепла между океаном и льдом, был создан в лаборатории турбулентности отдела океанографии школы дополнительного образования (аспирантуры) военно-морских сил США в рамках проекта по созданию наблюдательных сетей в Арктике, финансируемого национальным научным фондом США. Другое распространенное



название устройства – буй Тима Стэнтона (Tim Stanton), по имени руководителя проекта. Буй был сделан специально для того, чтобы лучше определить вертикальные потоки энергии, тепла и соли между океаном, льдом и атмосферой (NPS, 2019).

Устройство состоит из двух основных частей: – поверхностного блока, устанавливаемого на льду, и подводного набора измерительных датчиков, соединенных с поверхностным блоком через серию разъемов (рис. 7, 8). В поверхностном блоке расположен блок электроники, отвечающий за опрос датчиков, преобразование и передачу измеренных данных, антенна спутниковой связи IRIDIUM и GPS система. Здесь же содержится блок батарей, который, как и в случае с IMBB, углублен в относительно теплый, по сравнению с атмосферой, лед (Shaw et al., 2008; Stanton et al., 2009).

Autonomous Flux Buoy

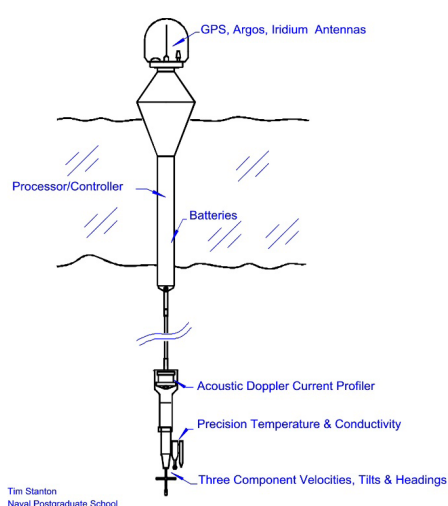


Рис. 7. Схема АОФБ – автономный буй, измеряющий потоки тепла между океаном и льдом (слева). GPS, Argos, Iridium antennas – антенны системы навигации GPS и систем спутниковой связи Аргос и Иридиум. Processor/controller – вычислительный узел и узел опроса датчиков. Batteries – электрические батареи. Acoustic Doppler Current Profiler – акустический доплеровский измеритель течения. Precision Temperature & Conductivity – высокоточные термометр и ячейка проводимости. Three Component Velocities, Tilts and Headings – измеритель трех компонент скорости воды, наклона и поворота. Рисунок взят из (NPS, 2019). Внешний вид поверхностного блока АОФБ (справа) после его установки силами автора (человек слева) и немецкого коллеги в АБ в сентябре 2007 г.

Фото автора.

Измерительный блок, закрепленный на жесткой стальной мачте в 2–3 м от нижней поверхности льда, состоит из стандартного, направленного вниз 300 kHz акустического доплеровского измерителя течений (ADCP, RDI Workhorse), а также высокоточной ячейки электропроводности и платинового термометра (FSI, OEM C-T Sensor) вместе с термистором с малой инерционностью. Этот блок снабжен также точечным трехкомпонентным измерителем течения, наклона и поворота буя (Falmouth Scientific Inc. (FSI), ACM 3D current meter) (рис. 7). Набор этих параме-



тров достаточен для вычисления упомянутых выше потоков. Опрос датчиков буя производится 6–8 раз в сутки. Каждый цикл измерений имеет продолжительность 20 мин. Из измеренных за 20 мин параметров процессор самого буя производит серию осреднений, а также вычислений статистических характеристик, включая частотные спектры. Результаты расчетов передаются на береговой компьютер 2 раза в сутки. Причем это двухсторонняя связь с берегового компьютера, можно изменять параметры работы АОФВ дистанционно.

Первый АОФВ был установлен в приполюсном районе 2002 г. После этого ежегодно в Арктике устанавливалось различными научными группами по 1–4 АОФВ. К началу 2019 г. свои измерения в АБ закончили 38 таких буев, и, как кажется, ни один не продолжает свою работу в октябре 2019 г. Исходя из личного опыта, автор считает, что механическая конструкция и блок электроники АОФВ достаточно надежны, поскольку за все время применения только у одного буя отказал датчик температуры. Все АОФВ производят измерения минимум несколько месяцев и прекращают работу, судя по всему, из-за деформаций льда.

В установке АОФВ должны участвовать минимум два физически крепких человека. Относительно большой вес устройства с лихвой компенсируется целой серией удачных конструктивных решений. Практически невозможно совершить ошибку при установке АОФВ. Все соединительные детали пронумерованы и покрашены в разные цвета, все элементы выполнены практически противоударными. Соединительные кабели верхней части АОФВ защищены удачной пружинистой конструкцией от лап белых медведей. Инструкция по установке, выполненная в виде фильма, выше всяких похвал. Часть АОФВ снабжается дополнительными источниками питания. Цель этих дополнений – сберечь ресурс батарей для увеличения продолжительности работы. Дополнительные источники питания – это бытовые ветрогенератор или солнечная батарея (рис. 7). Эти элементы буя не имеют конструктивных решений, которые можно признать удачными для условий Арктики, однако их отказ или полное разрушение не влечет за собой прекращение работы самого АОФВ.

На дальнем плане правой части рис. 7 виден ветровой генератор. Цилиндр стального цвета ниже красной вершины устройства и полосы стального цвета с надписями – пружинящая конструкция, надежно закрывающая все надводные кабели и разъемы АОФВ (рис. 7).

### **Профилирующая система для полярных океанов POPS**

Polar Ocean Profiling System (POPS) – профилирующая система для полярных океанов – начала создаваться совместными усилиями японского агентства по морским наукам и технологиям JAMSTEC и канадской компании MetOcean в 2004 г. (Kikuchi, Inoue, Langevin, 2007). Уже в 2005 г. устройства прошли натурные испытания, а в 2006 г. POPS начала свои измерения. Столь быстрый прогресс в конструировании устройства основывался на предыдущем опыте партнеров по

созданию автоматических устройств для морских измерений вообще и для полярных районов в частности. Так один из основных элементов POPS – поверхностная, устанавливаемая на льду платформа, является почти точной копией такой же части предыдущей системы JAMSTEC Compact Arctic Drifter (J-CAD). J-CAD – дрейфующая система, которая измеряла и передавала по спутниковым каналам связи несколько характеристик атмосферы и температуру – соленость – давление – скорость и направление течений на семи горизонтах верхних 250 м океана. За 2000–2004 гг. 10 J-CAD отработали в Арктике.

На платформе установлены датчики температуры воздуха и приповерхностного слоя воды (обе модели YSI 44032), GPS приемник (модель Conexant Jupiter Model TU 35-D410-031), барометр (Vaisala PTB100), система передачи данных через модем Iridium (модель SBD 9522A LBT).

Второй основной элемент POPS – CTD зонд, который в автоматическом режиме двигается по подвешенному в воде тросу в пределах горизонтов 5×800 м, представляет собой не что иное, как один из известных и активно применяемых в открытом океане ARGO буев PROVOR. PROVOR перемещается вертикально за счет изменения собственной плавучести встроенной помпой (рис. 8). POPS выпускается канадской компанией MetOcean (MetOcean Systems, 2019). Для установки POPS на льду требуется не менее двух подготовленных и физически крепких людей (рис. 9).

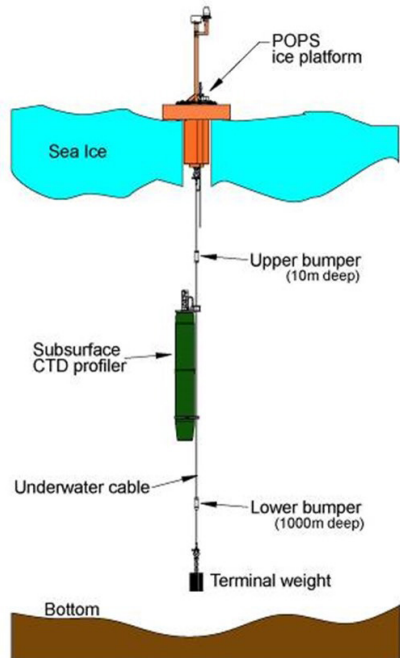


Рис. 8. Схема Polar Ocean Profiling System (POPS) – профилирующая система для полярных океанов. POPS ice platform – ледовая платформа профилирующей системы для полярных океанов. Sea Ice – морской лед. Upper bumper (10 m deep) – верхний ограничитель движения CTD профилографа, расположенный на 10 м глубины. Subsurface CTD profiler – подповерхностный CTD профилограф. Underwater cable – подводный кабель. Lower bumper (1000 m deep) – нижний ограничитель движения CTD профилографа, расположенный на 1000 м глубины. Terminal weight – натяжной груз. Bottom – дно. Рисунок адаптирован из (JAMSTEC, 2019).

Автору настоящей статьи не удалось обнаружить абсолютно точных сведений относительно количества POPS, которые устанавливались в Арктике с 2006 г., но их было не менее 10-ти, поскольку именно столько наборов вертикальных профилей температуры и солености, измеренных POPS с различными порядковыми номерами, содержится в нескольких источниках океанографических данных. Все 10 POPS



Рис. 9. Моменты постановки POPS в 2009 и 2011 гг. в приполюсном районе усилиями высокоширотных экспедиций ИОРАН (автор статьи в красной куртке слева и в темной куртке справа) совместно с японскими коллегами. Фото автора.

измерили всего только порядка 800 вертикальных профилей в водной толще, но в разы больше метеорологических данных. Как правило, измерения характеристик атмосферы программируется для POPS с интервалом в 1–2 часа, хотя вертикальные профили температуры и солености планируется измерять через 24–48 час. Продолжительность STD измерений (измерений водной толщи) POPS гораздо меньше заявленной в документации (1.5–2 года). Срок службы составлял к началу 2012 г., в среднем, 2–3 месяца. Автор настоящей статьи не имеет сведений об установке POPS какой-либо экспедицией после 2012 г. Кажется, что от их применения отказались, ввиду целого ряда выявленных недостатков.

Среди очевидных недостатков POPS следует выделить, прежде всего, непродуманность процесса установки подводной части устройства. Операция по сути сводится к необходимости стравливания без каких-либо тормозных устройств 700–1000 м троса в пластиковой оболочке с грузом 50 кг на конце через блок треноги. Французские, японские и германские специалисты, причем в последних двух группах был автор настоящей статьи, применяли различные способы для обеспечения плавности стравливания. В правой части рис. 9 в качестве примера показан момент плавного стравливания натянутого троса в пластиковой оболочке с помощью самодельного ленточного тормоза, производящего торможение за счет трения с тросом, намотанным на транспортировочную катушку.

Во всех случаях пластиковая оболочка троса подвергалась риску деформации. Порча изоляции троса не позволяет передавать информацию из-под воды через индукционный модем. Иногда разрушение изоляции троса было заметно еще над водой. В этом случае на месте производилась герметизация. Иногда, судя по относительно короткой штатной работе подводного блока POPS, разгерметизация происходила позже. Соленая вода проникала через малозаметное нарушение пластиковой оболочки, и подводный блок переставал передавать информацию на поверхностный блок и далее на спутник.

К первому принципиальному недостатку примыкает и второй. Компания производитель POPS снабжает устройство тросами с низким качеством пластиковой оболочки. Любой метод стравливания такого нагруженного троса создает большой

риск повреждения изоляции троса и последующего отказа подводного блока. Из 6-ти POPS, в установке которых автор участвовал лично, 2 прекратили работу сразу после установки по причине повреждения троса. Возможно, конечно, что были и другие причины, например, связанные с электроникой. POPS, которые даже не начали измерения, не попадают в статистику установленных в Арктике устройств. Одна POPS из 6-ти передавала данные с подводного блока от случая к случаю и через 2 месяца прекратила передачу. Другая, производила измерения только в верхних 180 м, поскольку поврежденный кабель пришлось вырубать из-за невозможности произвести герметизацию на морозе  $-35^{\circ}\text{C}$ . Только одна POPS работала после установки штатно, да и то, только около 6-ти месяцев.

Еще одним недостатком POPS является выбор веса подводного груза. С одной стороны, 50 кг – уже солидный вес, достаточный, чтобы затруднять плавное стравливание троса без тормозных устройств, а с другой, при большем дрейфе, трос с таким грузом отклоняется, и PROVOR не может двигаться вдоль него из-за недостатка силы плавучести для подъема против встречного потока воды. Прибор застревает на каком-то горизонте и зондирований не происходит вплоть до ослабления дрейфа. Как и описанный ранее другой продукт компании MetOcean IMB, POPS также не имеет какой-либо защиты соединительных кабелей поверхностной платформы от вандализма белых медведей.

### **Профилограф ИТР**

Ice-Tethered Profiler (ИТР) – профилограф, привязанный ко льду – производит те же STD измерения, что и POPS. В начале 2000-х годов, устройство было разработано в Вудс-Хольском океанографическом институте (WHOI) США (Krishfield et al., 2006; Krishfield et al., 2008; Ice-Tethered Profiler, 2019). ИТР производятся в американской компании McLane Research Laboratories Inc. Первый ИТР был установлен в Арктике в 2004 г. в Американо-Евразийской части АБ. В апреле 2007 г. ИТР под порядковым номером 7 был первым, который, при участии автора этой статьи, установили в Евразийской части АБ. На 20 октября 2019 г. 96 ИТР закончили свои измерения в Арктике, а другие 15 продолжают работу.

Поверхностный блок ИТР располагается на льду внутри алюминиевого цилиндра, который, в свою очередь, расположен внутри габаритной оболочки из полиуретана специального химического состава. Под воду опущен трос длиной порядка 800 м в пластиковой оболочке, натянутый концевым грузом 120 кг. Вдоль троса, с заранее заданной периодичностью, обычно 1–4 раза в сутки, передвигается STD зонд. В поверхностном блоке располагаются электроника контроллера и индуктивного модема, навигационная система GPS, система спутниковой связи IRIDIUM, антенны навигации и связи, батареи. Полиуретановая оболочка очень хорошо защищает поверхностный блок от встреч с когтями белого медведя и от деформаций льда. Кроме того, начиная с 2010 г., модификация этой оболочки стала обеспечивать сохранение плавучести системы в случае попадания ИТР со льда в открытую воду.

Подводный трос в пластиковой оболочке имеет диаметр 0.6 см и всегда, в отличие от POPS, хорошего качества. Нарушение пластиковой оболочки при установке буя, что приводит к прекращению передачи данных с CTD зонда через индукционный модем, для ИТР практически невозможно. Большой вес концевого груза обеспечивает небольшие отклонения троса при сильном дрейфе льдины. Тем ни менее, верхние 5–7 м несущего троса дополнительно усилены 9-ти сантиметровой пластиковой оболочкой, чтобы исключить возможность перетирания троса о нижнюю кромку льда. CTD зонд, сконструированный для ИТР, имеет внешнее сходство с любым ARGO профилографом. В качестве CTD блока измерений используется широко распространенный набор датчиков Sea-Bird Electronics Inc. модель 41-CP. На часть ИТР устанавливаются, в дополнение к CTD, еще и датчики растворенного кислорода SBE модель 52-MP. В отличие от ARGO профилографов и POPS, профилограф ИТР движется вверх и вниз со скоростью 0.25 м/сек не за счет изменения плавучести, а с помощью эффективного электрического двигателя (рис. 10).

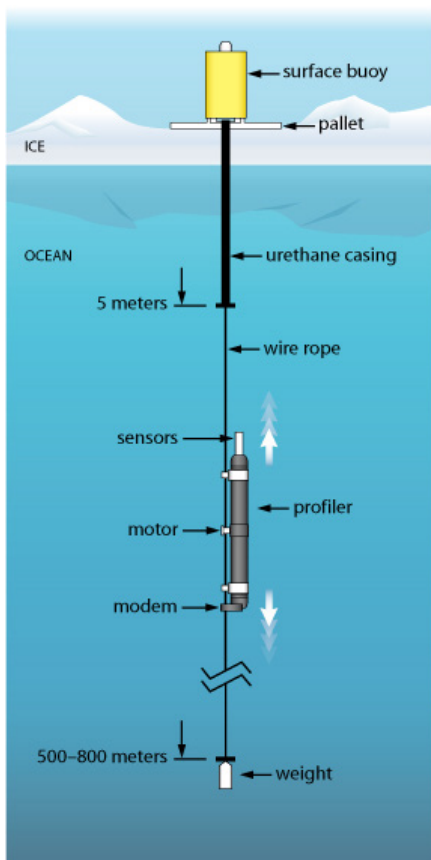


Рис. 10. Схема ИТР. Surface buoy – поверхностный буй.

Pallet – платформа под буй из окрашенной в белый цвет фанеры. Ice – лед. Ocean – океан. Urethane casing – дополнительная полиуретановая защитная оболочка в верхней части несущего кабеля. 5 meters – 5 метров.

Wire rope – несущий кабель. Sensors – датчики. Profiler – профилограф. Motor – мотор. Modem – модем. 500–800 meters – 500–800 метров. Weight – груз.

Рисунок взят из (Ice-Tethered Profiler, 2019).

Система по установке ИТР имеет целый ряд чрезвычайно удачных конструктивных решений. Из-за большого веса концевого груза и кабеля для установки ИТР, помимо треноги и системы блоков, стопоров, цепных лебедок и перехватов, используется еще и специальная лебедка с надежной тормозной системой и возможностью подъема подводной части ИТР электрической тягой в случае необходимости. (Заметим, что подъем кабеля и профилографа POPS, в случае обнаружения



неисправностей при постановке, не предусмотрен). Установку ИТР возможно провести силами двух подготовленных человек за 3–5 часов. Однако перемещение всех элементов ИТР и устройств для его установки от вертолета, самолета или ледокола в точку постановки требует большего числа людей (рис. 11).

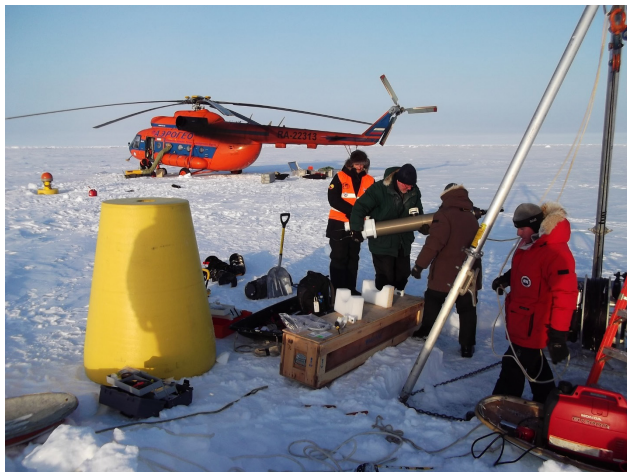


Рис. 11. Процесс установки ИТР76 группой специалистов из WHOI с участием автора и экипажа российского вертолета. Приполюсной район, апрель 2014 г. Фото автора.

ИТР показывают высокую надежность работы. Так, например, ИТР 16, установленный при участии автора осенью 2007 г., после пяти месяцев успешных измерений был, судя по неизменности координат, зажат многолетними льдами к северу от Канадского Арктического архипелага. Данные STD профилей не передавались следующую пару месяцев. Положение буя относительно восторошенных льдов затем, судя по всему, поменялось, и двухмесячный массив STD профилей был передан на береговой компьютер. Большинство ИТР, устанавливаемых около Северного Полюса, генеральным дрейфом выносятся через пролив Фрама в Гренландское море, где их многомесячную работу в разряженных льдах или на открытой воде можно проследить вплоть до южной оконечности Гренландии и моря Лабрадор. По сути, буи ИТР, начиная с 2007 г., уже несколько десятков раз повторили, выполняя свои измерения, героический 9-и месячный дрейф СП–1 в 1937 г. под руководством И.Д. Папанина. Часть буев, устанавливаемых в круговороте моря Бофорта, работали штатно более трех лет и затем были вынуты для перезарядки батарей и нового использования работающими в этом районе ледокольными экспедициями.

### **Буй для измерений параметров атмосферы, льда и океана – IAOOS**

Ice – Atmosphere – Arctic Ocean Observing System (IAOOS) – устройство, сконструированное и изготавливаемое несколькими французскими организациями, для проведения контактных измерений с дрейфующего льда нескольких характеристик системы атмосфера–лед–океан (IAOOS, 2019). Проект по созданию и установке на ледяных полях АБ 40-ка IAOOS стартовал в феврале 2011 г. с бюджетом 5.1 млн евро. Планировалось разработать комплексный буй IAOOS, а потом устанавливать по 5–6 буев ежегодно во время участия французских специалистов в экспедициях, организуемых другими странами. В декабре 2019 г. проект должен закончиться. По

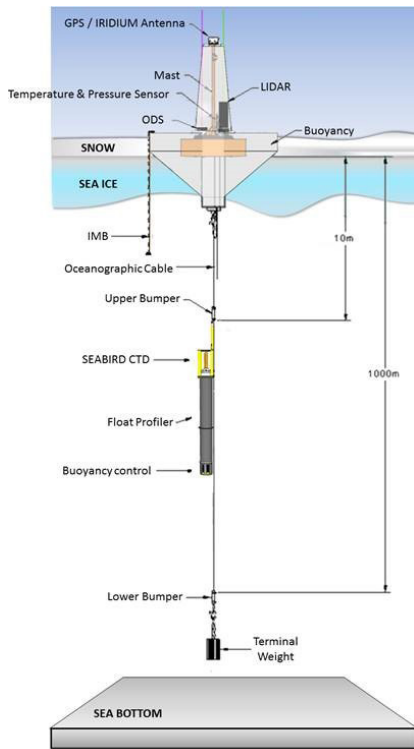


Рис. 12. Схема IAOOS. GPS / IRIDIUM antenna – антенны навигационной системы GPS и системы спутниковой связи Iridium. Mast – мачта. Temperature and pressure sensors – датчики температуры и давления. Lidar – лидар. ODS – датчик оптической глубины атмосферы. Buoyancy – плавучесть. Snow – снег. Sea Ice – морской лед. IMB – блок измерения толщины и температуры льда. Oceanographic cable – океанографический кабель. Upper bumper – верхний ограничитель движения зонда по кабелю. SeabirdCTD – блок датчиков температуры, электропроводности и давления компании Sea Bird. Float Profiler – корпус CTD зонда. Buoyancy controller – блок изменения плавучести корпуса CTD зонда. Lower bumper – нижний ограничитель движения зонда по кабелю. Terminal weight – концевой груз. Рисунок взят из (IAOOS, 2019).

сведениям автора, с 2013 г. удалось установить и получить научную информацию с 30-ти IAOOS.

IAOOS – гораздо сложнее по конструкции, чем все перечисленные ранее устройства. Он измеряет в атмосфере, помимо температуры и давления воздуха, еще и вертикальную структуру облаков, дымки, аэрозоли. В океане выполняются вертикальные CTD зондирования с возможностью, при необходимости, дополнительной установки на подводный зонд еще нескольких датчиков. Во льду IAOOS измеряет температуру и изменения толщины. Периоды измерений различными датчиками IAOOS и время сеансов передачи информации в береговой центр сбора данных программируются перед установкой буя на лед. На IAOOS можно добавлять еще несколько датчиков, из числа тех, которые потребляют мало электрической энергии (рис. 12, 13).

На переднем плане левой части рис. 13 видно, что на платформе закреплены дополнительные датчики – 2 разнесенные вертикальные GPS антенны, по данным которых определяют не только координаты, но и повороты ледяного поля. Еще один дополнительный датчик – это видимый на ближнем плане пиранометр, поднятый к открытому небу относительно высокой вертикальной мачтой.

При попадании на открытую воду IAOOS не тонет, а продолжает измерения (хотя, по мнению автора, при сильном волнении моря, не демпфированный подвес подводного кабеля с грузом и зондом перетрется и оторвется через несколько суток). Учитывая запас плавучести поверхностной платформы IAOOS, автору доводилось механически прикреплять к ней несколько автономных океанологических самописцев с тем, чтобы при обнаружении этой платформы в Гренландском море (а применительно именно к этому IAOOS его поиск и подъем судном планировались

и были выполнены) получить дополнительные характеристики верхнего слоя океана вначале подо льдом, а затем и на открытой воде.

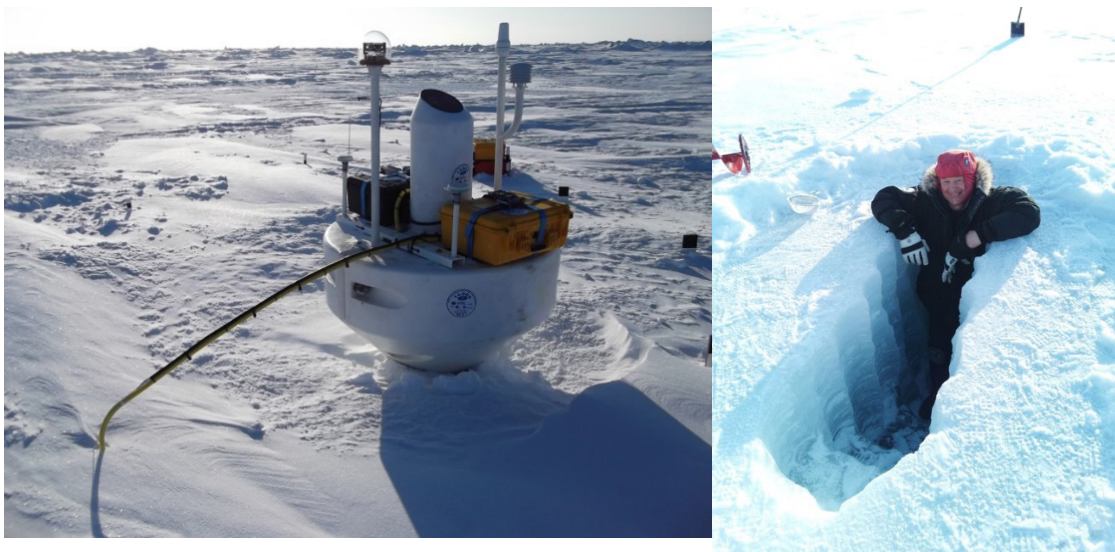


Рис. 13. Слева – внешний вид надводной части IAOOS, установленного в приполюсном районе в апреле 2014 г. Справа – автор внутри недобуренного до воды прямоугольного отверстия во льду, которое необходимо для установки IAOOS. При полярном районе, апрель 2018 г. Фото автора.

Как и все описываемые в этой статье устройства, IAOOS, в основном, состоит из элементов, которые так или иначе уже применялись в других изделиях (рис. 12, 13). Этим обстоятельством, в том числе, объясняется факт, что IAOOS был сконструирован за период времени около года. Поверхностная платформа IAOOS полностью повторяет конструкцию буя, разработанного в рамках проекта европейского сообщества 2007–2012 гг. АСОВАР (Acoustic Technology for observing the interior of the Arctic Ocean – акустические технологии для наблюдений в Центральном Арктическом Бассейне). Подвеска СТД зонда, сам зонд,двигающийся по вертикали, как и POPS, за счет изменения своей плавучести, подводный кабель, форма груза, метод установки IAOOS – все это модификации устройств и действий буя АСОВАР. Датчик оптической глубины, применяемый в IAOOS для измерений характеристик атмосферы, ранее применялся во французских программах исследования Марса. Микролидар, также применяемый в IAOOS для измерений в атмосфере, уже несколько лет использовался конструкторами буя в экспедициях. Измеритель характеристик льда – это описанный в настоящей статье SIMBA.

Буй IAOOS не технологичен в установке, на которую уходит, в зависимости от толщины и твердости льда, от 6-ти до 18-ти ч чистого времени работы 3-х подготовленных специалистов. Основной недостаток IAOOS – необходимость выбуривания во льду прямоугольного отверстия, состоящего из двух рядов по 6–8 перекрывающихся лунок диаметром 30 см каждая (рис. 13). При толщине льда более 1.2 м и работе ручным шнековым буром – это задача мало кому по силам. И дело даже не в том, что необходимо выбурить и вынуть большой объем льда, а в том, что

очень трудно при бурении не оставить под водой ледяные перемычки, которые потом долго обнаруживать и выпиливать. Поскольку и POPS и ИТР устанавливаются с выбуриванием одного отверстия диаметром 30 см, то эти устройства можно устанавливать даже на многолетних льдах толщиной 4–5 м. Для IAOOS трудно представить возможность установки на льду толще 2 м.

Создатели IAOOS, среди которых явно были любители альпинизма и парусного спорта, стремясь уменьшить вес оборудования и инструментов, с помощью которых буй IAOOS устанавливают на лед, предусмотрели применение при работах не цепные лебедки, металлические блоки и другие простые в применении приспособления, а множество веревок. Весь комплекс узлов, которые надо быстро завязывать и развязывать на морозе при установке IAOOS не знает, наверное, ни один даже опытный боцман. В результате, длительная подготовка специалиста для установки IAOOS необходима безальтернативно.

### Заключение

В первом десятилетии 21-го века произошла настоящая техническая революция в области измерений характеристик природной среды Арктики и, в частности, в автономных контактных измерениях на дрейфующих ледяных платформах. Поступающие из труднодоступной Арктики реальные данные автономных измерений, коренным образом меняют обоснованность диагнозов и, отчасти, прогнозов состояния системы лед–океан–атмосфера в Северном Ледовитом океане. Число контактных измерений в АБ возросло лавинообразно. Так, например, в период с 2004 г. и до 20 октября 2019 г. все ИТР выполнили в центральном АБ 122600 вертикальных STD профилей в слое от 5 до не менее 700 метров. Если вспомнить, что бесспорно героические советские дрейфующие станции выполнили в Центральной Арктике с 1937 по 1990 гг., порядка 3500 станций с измерениями температуры и солености (многие из которых выполнялись, впрочем, до дна, а не только в верхних 1000 метрах) (Environmental Working Group..., 1997), то становится очевидным, что современные роботизированные элементы арктических систем наблюдения уже на порядок эффективнее прежних подходов к измерениям в Арктическом бассейне, по крайней мере, в области физической океанографии. Еще одним хорошим примером современного торжества технологий является тот факт, что легендарная папанинская четверка во время своего 9-ти месячного дрейфа, ценой невероятного напряжения, выполнила 37 океанографических станций (Папанин, 1977). А начиная с 2007 г., когда группа полярной океанологии ИО РАН в результате комплекса усилий приобщилась к узкому клубу ежедневных получателей результатов зондирований ИТР, мы ежедневно получаем от 10 до 60 высокоточных STD профилей из АБ.

Современная тенденция в использовании описанных в этой статье устройств – это располагать их группами в пределах одной льдины. Туда же устанавливают и PAWS – упомянутую выше автоматическую метеорологическую станцию в



полярном исполнении. Комплекс устройств позволяет расширить наблюдения в одной дрейфующей точке, а также контролировать и сверять работу множества датчиков. Все более традиционным становится прием, когда за состоянием такой автономной дрейфующей лаборатории наблюдает веб-камера, также передающая снимки на берег в реальном масштабе времени. По снимкам можно наблюдать, как это случилось, например, в июне 2011 г., для нескольких устройств установленных при участии автора, что лед раскололся между POPS, IMB и камерой. Затем POPS сместился относительно камеры, уже вне снимка, на 100 м (и POPS и камера передавали свои координаты). Затем, судя по снимкам и в соответствии с изменением направления ветра, трещина сомкнулась и образовались свежие торосы. Сразу после этого POPS прекратил передавать данные в результате, скорее всего, разрушения в результате торошения.

В 2015 г. автор в течении 4-х месяцев ежедневно получал и анализировал результаты измерений десятка автономных измерительных устройств, установленных на расстоянии 500–600 м от обитаемого сезонного дрейфующего лагеря СП–2015. Так вот, увидев, скажем, следы медведя на снимке одной из трех установленных камер, я звонил ученым-участникам дрейфа, чтобы сообщить эту новость. Только после этого они и сами обнаруживали хищника вблизи своего лагеря. На снимках тех же камер автор 2 раза замечал некоторые повреждения в автономных устройствах, которые происходили по виде того же медведя или неудачного для вертикального положения буя таяния снега. В этих случаях, проинструктированные заранее сотрудники обитаемого лагеря, выходили к автономному устройству и поправляли его.

Представляется, что содержание работ обитаемых арктических многомесячных дрейфующих станций будет меняться. Личному составу понадобится скорее обслуживать или слегка ремонтировать совершенно автономные или полуавтоматические измерительные устройства, чем самим выполнять измерения, по крайней мере те, которые можно надежно автоматизировать. Десятки роботизированных устройств для контактных измерений с дрейфующего льда, и, в том числе те, которые описаны в настоящей статье, расставляемые в эти дни октября 2019 г. на расстояниях от 1 до 100 км вокруг вмороженного в лед ледокола Polarstern в самом начале дрейфа продолжительностью год (MOSAiC, 2019), с очевидностью свидетельствуют в пользу новых тенденций в области получения натуральных данных из Центральной Арктики.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема № 0128-2019-0011).

## Литература

- Андреев А.О., Дукальская М.В., Фролов С.В.* Международный полярный год. История и перспективы. Под редакцией профессора И.Е. Фролова и канд. физ.-мат. наук В.И. Боярского. Санкт-Петербург: ААНИИ, 2007. 118 с.
- Папанин И.Д.* Лед и пламень. М.: Политиздат, 1977. 416 с.



- Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М. Шестидесятилетняя цикличность в изменениях климата полярных регионов // *Материалы гляциологических исследований*. 2008. Т. 105. С. 158–165.
- AHDR (Arctic Human Development Report). Akureyri: Stefansson Arctic Institute. 2004. P. 232.
- Polashenski C., Perovich D., Richter-Menge J., Elder B. Seasonal ice mass-balance buoys: adapting tools to the changing Arctic // *Annals of Glaciology*. 2011. Vol. 52(57). P. 18–26.
- Dickson B. The integrated Arctic Ocean Observing System (iAOOS): an AOSB-CliC Observing Plan for the International Polar Year. 2006. P. 16.
- Environmental Working Group joint U.S.-Russian Atlas of the Arctic Ocean - winter period. Edited by L. Timokhov and F. Tanis. Ann Arbor, MI: Environmental Research Institute of Michigan in association with the National Snow and Ice Data Center, 1997. CD-ROM.
- Fer I., Harms I., Martin T., Pisarev S., Rudels B., Schauer U., Sirevaag A. Water Masses and Circulation. The expedition ARCTIS XIX/1 a.b and XIX/2 of the Research Vessel "Polarstern" in 2003 // *Reports on Polar and Marine Research*, 2004, Vol. 481, ISSN 1618-3193. P. 72–92.
- IAOOS. Ice – Atmosphere - Arctic Ocean Observing System // <http://iaaos.ent.upmc.fr/en/index.html> (дата обращения 20.10.2019)
- Ice-Tethered Profiler // <https://www.whoi.edu/website/itp> (дата обращения 20.10.2019)
- JAMSTEC. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology // [https://www.jamstec.go.jp/j/about/press\\_release/2006/20060613/1.pdf](https://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/2006/20060613/1.pdf) (дата обращения 18.10.2019).
- Kikuchi T., Inoue J., Langevin D. Argo-type profiling float observations under the Arctic multiyear ice. *Deep-Sea Research*. I. 2007. Vol. 54. P. 1675–1686.
- 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. Vol. 25. P. 2091–2095.
- Krishfield R., Doherty K., Frye D., Hammar T., Kemp J., Peters D., Proshutinsky A., Toole J. and von der Heydt K. Design and Operation of Automated Ice-Tethered Profilers for Real time Seawater Observations in the Polar Oceans. Woods Hole Oceanographic Institution. Technical Report 2006–11. 2006. P. 75.
- Kristoffersen Y., A. Tholfsen J. Hall K., Stein R. Scientists spend Arctic winter adrift on sea ice. 2016. *Eos* 97. <https://doi.org/10.1029/2016EO060711>. Published on 11 October 2016.
- MetOcean Systems // <https://www.metocean.com/shop/metocean-systems/> (дата обращения 18.10.2019).
- MOSAiC. Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate // <https://www.mosaic-expedition.org/> (дата обращения 18.10.2019).
- NPS Autonomous Ocean Flux Buoy Program // <https://www.oc.nps.edu/~stanton/fluxbuoy/index.html> (дата обращения 18.10.2019).
- OPTIMISM. Observing processes impacting the sea ice mass balance from in situ measurements // <https://optimism.locean-ipsl.upmc.fr/tiki-index.php?page=Ice-T> (дата обращения 18.10.2019).
- Benjamin R., Pisarev S., Shauer U., Wisotzki A., Rudels B., Kikuchi T., Mechier S. Oceanography. Expeditionprogramm Nr.78, FS Polarstern, ARK XXII/1a, XXII/1b, XXII/1c, XXII/2, 2007 // Alfred Wegener Institute of Polar and Marine Research, Bremerhaven, April, 2007. P. 80.
- Richter-Menge J.A., Perovich D.K., Elder B.C., Claffey K., Rigor I., Ortmeier M. Ice mass-balance buoys: a tool for measuring and attributing changes in the thickness of the Arctic sea-ice cover // *Annals of Glaciology*. 2006. Vol. 44. P. 205–210.

DOI:10.3189/172756406781811727.

SAMS. Research Services LTD. // <https://www.srsl.com/services/autonomous-ice-measurement/> (дата обращения 18.10.2019).

SCICEX. Submarine Arctic Science Program. // <https://nsidc.org/scicex/> (дата обращения 18.10.2019).

*Shaw W.J., T.P. Stanton, M.G. McPhee.* Estimates of surface roughness length in heterogeneous under-ice boundary layers // *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113. P. C08030. DOI:10.1029/2007JC004550.

*Stanton T.P., Shaw W.J., and Hutchings J.* Variability of summertime ocean to-ice heat flux in the Transpolar Drift: 2002–2007 // *J. Geophys. Res.* 2009.

## MODERN DRIFTING ROBOTIZED DEVICES FOR CONTACT MEASUREMENTS OF PHYSICAL CHARACTERISTICS OF THE ARCTIC BASIN

**Pisarev S.V.**

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,  
36 Nahimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia, e-mail: [pisarev@ocean.ru](mailto:pisarev@ocean.ru)  
Submitted 05.10.2019, accepted 21.11.2019*

A description of all available automatic devices that have constructed to carry out contact measurements of ice and ocean characteristics from drifting sea ice at low air temperatures is given. All the devices under consideration work according to the programmed schedules, transmit the results of measurements to the coastal centers in real time, have GPS navigation. The devices are manufactured individually or in limited batches and are not prototypes or operating models. In addition, all these types of devices have already made successful measurements in the Arctic for a year or more. The description of the devices is given not only according to information from the specialized literature, but also on the basis of the author's many years of personal experience in working with this observational technique in the Arctic basin.

**Keywords:** Arctic basin, I.D. Papanin, sea drifting ice, stand-alone drifting ice tethered device

### References

AHDR (Arctic Human Development Report). Akureyri: Stefansson Arctic Institute, 2004, pp. 232.

*Andreyev A.O., Dukal'skaya M.V., and Frolov S.V.* Mezhdunarodnyy polyarnyy god. Istoriya i perspektivy. (International Polar Year. History and Perspectives) Pod redaktsiyey professora I.Ye. Frolova i kand. fiz.-mat. nauk V.I. Boyarskogo. (edited by Frolov I.E and Boyarsky V.I.) Sankt-Peterburg: AANII, 2007, 118 p.

*Dickson B.* The integrated Arctic Ocean Observing System (iAOOS): an AOSB-CliC Observing Plan for the International Polar Year, 2006, pp. 16.

- Environmental Working Group joint U.S.-Russian Atlas of the Arctic Ocean – winter period. Edited by L. Timokhov and F. Tanis. Ann Arbor, MI: Environmental Research Institute of Michigan in association with the National Snow and Ice Data Center, 1997, CD-ROM.
- Fer I., Harms I., Martin T., Pisarev S., Rudels B., Schauer U., and Sirevaag A.* Water Masses and Circulation. The expedition ARCTIS XIX/1 a.b and XIX/2 of the Research Vessel 'Polarstern' in 2003. *Reports on Polar and Marine Research*, 2004, Vol. 481, ISSN 1618-3193, pp. 72–92.
- Frolov I.Ye., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., and Smolyanitskiy V.M.* Shestidesyatiletnyaya tsiklichnost' v izmeneniyakh klimata polyarnykh regionov (Sixty-year cyclicality in climate change in the polar regions). *Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy*, 2008, Vol. 105, pp. 158–165.
- IAOOS. Ice – Atmosphere – Arctic Ocean Observing System. <http://iaoos.ent.upmc.fr/en/index.html> (дата обращения 20.10.2019).
- Ice-Tethered Profiler. <https://www.whoi.edu/website/itp> ,(дата обращения 20.10.2019)
- JAMSTEC. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology. [https://www.jamstec.go.jp/j/about/press\\_release/2006/20060613/1.pdf](https://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/2006/20060613/1.pdf) (дата обращения 18.10.2019).
- Kikuchi T., Inoue J., and Langevin D.* Argo-type profiling float observations under the Arctic multiyear ice. *Deep-Sea Research. I.* 2007, Vol. 54, pp. 1675–1686.
- Krishfield R., J. Toole, A. Proshutinsky, and M.-L. Timmermans.* Automated Ice-Tethered Profilers for seawater observations under pack ice in all seasons. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2008, Vol. 25, pp. 2091–2095.
- Krishfield R., K. Doherty, D. Frye, T. Hammar, J. Kemp, D. Peters, A. Proshutinsky, J. Toole and K. von der Heydt.* Design and Operation of Automated Ice-Tethered Profilers for Real time Seawater Observations in the Polar Oceans. *Woods Hole Oceanographic Institution. Technical Report 2006–11*, 2006, p. 75.
- Kristoffersen Y., Tholfsen A., Hall J.K., and Stein R.* Scientists spend Arctic winter adrift on sea ice. 2016, *Eos* 97, <https://doi.org/10.1029/2016EO060711>. Published on 11 October 2016.
- MetOcean Systems. <https://www.metocean.com/shop/metocean-systems/> (дата обращения 18.10.2019).
- MOSAiC. Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate. <https://www.mosaic-expedition.org/> (дата обращения 18.10.2019).
- NPS Autonomous Ocean Flux Buoy Program. <https://www.oc.nps.edu/~stanton/fluxbuoy/index.html> (дата обращения 18.10.2019).
- OPTIMISM. Observing processes impacting the sea ice mass balance from in situ measurements. <https://optimism.locean-ipsl.upmc.fr/tiki-index.php?page=Ice-T> (дата обращения 18.10.2019).
- Papanin I.D.* Lod i plamen' (Ice and fire). Moscow: Politizdat, 1977, 416 p.
- Polashenski C., Perovich D., Richter-Menge E.J., and Elder B.* Seasonal ice mass-balance buoys: adapting tools to the changing Arctic. *Annals of Glaciology*, 2011, Vol. 52(57), pp. 18–26.
- Rabe Benjamin, Serge Pisarev, Ursula Shauer, Andreas Wisotzki, Bert Rudels, Takashi Kikuchi, and Sebastian Mechier.* Oceanography. Expeditionprogramm Nr.78, FS Polarstern, ARK XXII/1a, XXII/1b, XXII/1c, XXII/2, 2007, *Alfred Wegener Institute of Polar and Marine Research*, Bremerhaven, April, 2007, p. 80.
- Richter-Menge J.A., Perovich D.K., Elder B.C., Claffey K., Rigor I., and Ortmeyer M.* Ice mass-balance buoys: a tool for measuring and attributing changes in the thickness of the Arctic sea-ice cover. *Annals of Glaciology*. 2006, Vol. 44, pp. 205–210. doi:10.3189/172756406781811727

SAMS. Research Services LTD. <https://www.srsl.com/services/autonomous-ice-measurement/> (дата обращения 18.10.2019).

SCICEX. Submarine Arctic Science Program. <https://nsidc.org/scicex/> (дата обращения 18.10.2019).

*Shaw W.J., Stanton T.P., and McPhee M.G.* Estimates of surface roughness length in heterogeneous under-ice boundary layers. *Journal of Geophysical Res*, 2008, Vol. 113, pp. C08030, doi:10.1029/2007JC004550.

*Stanton T.P., Shaw W.J., and Hutchings J.K.* Observational study of relationships between incoming radiation, open water fraction, and ocean-to-ice heat flux in the Transpolar Drift: 2002–2010. *Journal of Geophysical Research*, 2012, Vol. 117, pp. C07005, doi: 10.1029/2011JC007871.