

Опыт применения автономных дрейфтеров в системе наблюдений ледовых полей и верхнего слоя океана в Арктике

© 2017 С.В. Мотыжев, Е.Г. Лунев, А.П. Толстошеев

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
e-mail: smotyzhev@mail.ru*

Поступила в редакцию 21.12.2016 г.

Рассмотрены конструктивные и эксплуатационные особенности термопрофилирующих дрейфтеров *BTC60/GPS/ice*, разработанных в Морском гидрофизическом институте Российской академии наук и ориентированных на применение в Арктическом регионе. По результатам статистического анализа долговременных натуральных дрейфтерных экспериментов в Арктике делается вывод о возможности и целесообразности построения на базе дрейфтеров *BTC60/GPS/ice* надежной, технологичной и экономной сети наблюдений Арктической зоны Мирового океана.

Ключевые слова: термопрофилирующий дрейфтер, ледовое поле, профиль температуры, верхний слой океана, арктические наблюдения.

DOI: 10.22449/0233-7584-2017-2-54-68

Введение. Для современного этапа освоения Арктики характерны, с одной стороны, повышенное внимание к процессам и явлениям, происходящим в Северном Ледовитом океане и приполярных морях, с другой – обусловленный особенностями региона дефицит океанографической и метеорологической информации. Анализ проблемы оперативного контроля состояния ледяного покрова верхнего, в том числе подледного, слоя океана, приповерхностной атмосферы в Арктическом регионе с необходимым пространственно-временным разрешением посвящено большое количество публикаций, смысл которых с точки зрения оценивания современного состояния наблюдательной сети коротко изложен в работе [1]. Систематизируя имеющиеся данные по средствам наблюдений Арктики, автор делает вывод, что, хотя полярные исследования с различными целями чрезвычайно актуальны, их практическая реализация остается делом технически и организационно непростым и дорогостоящим. С сожалением следует констатировать, что приборный парк, рассмотренный в [1], представлен исключительно зарубежными измерительными средствами, а наименее обеспечена наблюдениями Арктическая зона Российской Федерации. По данным, приведенным на интернет-сайте [2], из-за обвального сокращения в 90-е годы прошлого столетия полярных наблюдений к настоящему времени по критериям климатического мониторинга и долгосрочного прогноза погоды не достигается даже уровень минимально достаточной плотности наблюдений. Дефицит первичной информации негативно отражается на качестве гидрометеорологических прогнозов, вследствие чего прогностическая деятельность часто бывает малоэффективной.

В силу названных причин становится очевидной актуальность задачи установления оперативного комплексного мониторинга арктической системы

атмосфера – лед – океан. В определенной степени решение этой задачи связано с работами Морского гидрофизического института (МГИ) РАН по созданию методов и средств дрейфтерной технологии наблюдений и внедрению их в практику исследований Арктического региона Мирового океана. В данной работе рассматриваются специализированные дрейфтеры МГИ, ориентированные на использование в полярных условиях, и приводятся некоторые результаты долговременных натуральных дрейфтерных экспериментов в Северном Ледовитом океане и приполярных морях. Материалы направлены на обоснование возможности и целесообразности построения надежной, технологичной и экономной дрейфтерной наблюдательной сети как составной части устойчивой системы оперативных наблюдений Арктического региона.

Особенности дрейфтерной технологии наблюдений Арктического региона. В последние два десятилетия основным источником систематической оперативной контактной информации о состоянии верхнего слоя океана и приполярной атмосферы стали автономные дрейфующие платформы сбора данных – поверхностные дрейфтеры. Данные передаются пользователям по каналам спутниковых систем связи *Argos* или *Iridium*. Начиная с 2008 г. в Мировом океане поддерживается постоянно действующая наблюдательная сеть из 1250 дрейфтеров разных модификаций, что обеспечивает среднее пространственное разрешение 500×500 км. Базовым компонентом дрейфтерной наблюдательной сети является дрейфующий буй типа *SVP* [3], разработанный в начале 90-х годов прошлого столетия в рамках Всемирной программы исследований климата (*World Climate Research Programme – WCRP*).

В последние полтора десятилетия существенный вклад в развитие дрейфтерной технологии внес МГИ. Выполненные в институте разработки направлены на поддержание стандартной наблюдательной сети и главным образом – на создание новых дрейфтерных средств контроля среды и внедрение их в практику наблюдений Мирового океана.

Начиная с 2008 г. в МГИ в рамках дрейфтерной технологии развивается направление, ориентированное на создание методов и средств наблюдений полярных регионов. Технические и методические решения, реализованные в первых полярных дрейфтерных экспериментах и прошедшие долговременные испытания в арктических условиях, стали основой для создания специализированных автономных средств исследования водной толщи и ледяного покрова Арктики и методов их применения. Широкая номенклатура выполненных к настоящему времени разработок представлена двумя основными модификациями: спутниковые радиомаяки и термопрофилирующие дрейфтеры. Спутниковые радиомаяки предназначены для оперативного контроля траекторий ледовых образований (айсберги, ледники), термопрофилирующие дрейфтеры – для оперативного мониторинга термических процессов в верхнем, в том числе подледном, слое океана и долговременных наблюдений за движениями ледовых полей Северного Ледовитого океана и полярных морей. Обе модификации предполагают возможность измерения атмосферного давления.

Независимо от типов приборов все стадии их разработки, производства и испытаний были подчинены выполнению следующих общих принципов: простота доставки и не требующая специальной подготовки технология уста-

новки; долговременная надежность метрологических и эксплуатационных характеристик при автономной эксплуатации в условиях влияния воздействующих факторов, характерных для Арктического региона; относительно малая стоимость. Именно такой подход позволил создать конкурентоспособный на мировом рынке парк приборов для полярных исследований. Далее более подробно рассматриваются конструктивные и эксплуатационные особенности термопрофилирующих дрейфтеров и некоторые результаты их применения.

Термопрофилирующие дрейфтеры для исследования Арктического региона Мирового океана («ледовые» термодрейфтеры) представляют собой модификацию разработанного в 2004 г. в МГИ термопрофилирующего квазилагранжевого дрейфтера *SVP-BTC80/GPS* [4]. К настоящему времени технология исследования с помощью термодрейфтеров стала неотъемлемым компонентом современной системы оперативных наблюдений океана.

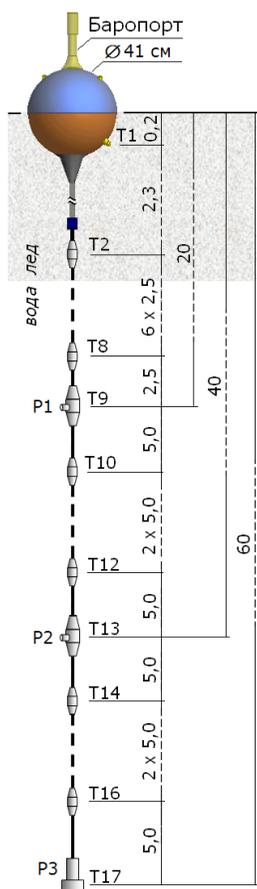


Рис. 1. Структура «ледового» термодрейфтера *BTC60/GPS/ice* (расстояния между датчиками – в метрах)

Структура построения «ледового» термодрейфтера типа *BTC60/GPS/ice* показана на рис. 1. В сферическом корпусе диаметром 41 см расположены вторичный преобразователь с модулем измерения атмосферного давления, приемник системы глобального позиционирования *GPS*, модем системы спутниковой связи *Iridium*, баропорт и элементы питания. К нижней части корпуса подсоединена термолиния длиной 60 м, в которую интегрированы датчики температуры и гидростатического давления.

Информационно-измерительная система термолинии реализована на основе сетевого стандарта *MicroLAN* [5]. В качестве преобразователей температуры в ней использованы интегральные цифровые термометры типа *DS18B20* (*Dallas Semiconductor*). Сетевой стандарт *MicroLAN* поддерживает протокол обмена и обеспечивает электропитание всех датчиков термолинии по одной шине типа «витая пара», что позволило минимизировать поперечный размер термолинии и тем самым снизить ее гидродинамическое сопротивление. Диаметр термолинии не превышает 13 мм, диаметры корпусов датчиков температуры и гидростатического давления – 20 и 40 мм соответственно. Такие габариты термолинии при общей массе дрейфтера не более 30 кг позволяют существенно упростить его доставку и установку, что имеет важное значение для исследований в полярных условиях. Конструкция дрейфтера обеспечивает возможность его постановки как на лед, так и на открытую водную поверхность с последующим вмержанием корпуса дрейфтера и верхней части термолинии в лед.

В модификации *BTC60/GPS/ice* термодрифтера измеряются атмосферное давление, температура воды на горизонтах, указанных на рис. 1, гидростатическое давление на горизонтах 20, 40 и 60 м, координаты. Погрешности измерений атмосферного давления – не более 2 гПа, температуры – 0,1°C, гидростатического давления – 30 гПа, координат – 50 м. Измерения всех параметров выполняются в начале каждого часа. Результаты измерений передаются в сообщениях по спутниковой системе связи *Iridium*. Задержка доставки сообщений пользователю – не более 10 мин.

Заметим, что указанные горизонты измерений следует рассматривать как номинальные. Реальные значения горизонтов могут отличаться от номинальных из-за отклонений термолинии от вертикали, обусловленных различиями между скоростью дрейфа корпуса (скорость дрейфа ледового поля) и скоростями течений на глубинах профилирования. Оценить реальную геометрию термолинии и, следовательно, вертикальные смещения горизонтов расположения датчиков температуры позволяют данные датчиков гидростатического давления. Модификация *BTC60/GPS/ice/lps* отличается тем, что гидростатическое давление измеряется только на конце термолинии (номинальный горизонт 60 м). В этом случае реальные положения горизонтов измерения температуры оцениваются путем решения задачи о равновесии троса в установившемся потоке [6].

С сентября 2012 г. по сентябрь 2014 г. в Арктике было развернуто более 30 термодрифтеров, разработанных в МГИ. Термодрифтеры применялись главным образом в рамках проекта *UpTempO* (Вашингтонский университет, США) [7] программы *International Arctic Buoy Program (IABP)*. Цель проекта – оперативные систематические контактные наблюдения термической изменчивости верхнего, в том числе подледного, слоя океана и приводной атмосферы в полярном регионе. Задачи проекта *UpTempO* определили два региона наибольшей интенсивности дрейферного мониторинга: море Бофорта – Канадская котловина и Центральная Арктика. Траектории термодрифтеров и подробные статистические сведения о результатах их применения в проекте приведены в [8].

Далее рассматриваются некоторые, наиболее интересные на наш взгляд, результаты термодриферного мониторинга характеристик движения ледовых полей, термической изменчивости верхнего подледного слоя океана. Результаты долговременного мониторинга поля давления приповерхностного слоя атмосферы над Арктическим регионом подробно рассмотрены в [9].

Визуальный анализ траекторий дрейфов. В экспериментах по проекту *UpTempO* почти все дрейферы были развернуты в августе – сентябре 2012 и 2013 гг., т. е. в периоды, когда арктический ледяной покров обычно достигает годового минимума. В море Бофорта – Канадской котловине было развернуто 15 (общая продолжительность дрейфов – более 3000 сут), в Центральной Арктике – 5 термодрифтеров (более 1800 сут).

Траектории термодрифтеров, дрейф которых полностью или большей частью определялся дрейфом ледовых полей, показаны на рис. 2. Там же белым цветом обозначена ледовая обстановка по состоянию на время развертывания – сентябрь 2013 г. и сентябрь 2014 г.

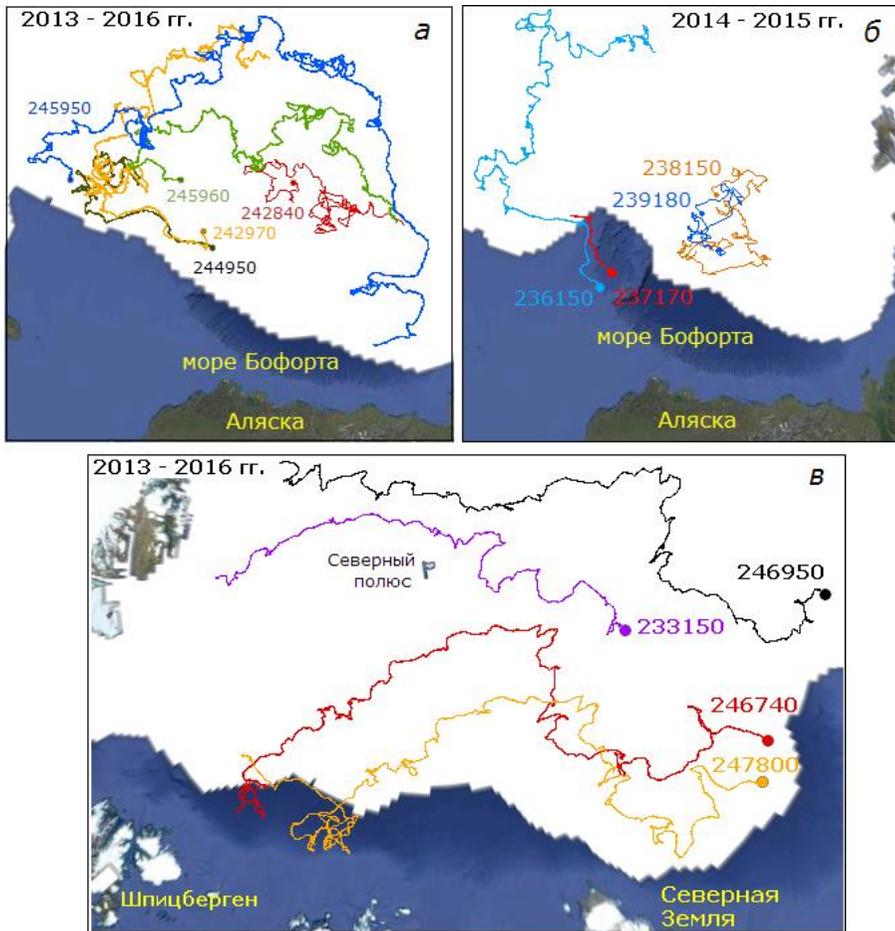


Рис. 2. Траектории дрейфов термопрофилирующих дрейфтеров МГИ в море Бофорта – Канадской котловине. Начало дрейфа: *а* – в августе – сентябре 2013 г.; *б* – в августе – сентябре 2014 г. То же – в Центральной Арктике, начало дрейфа – в августе – сентябре 2013 г. (*в*). Дрейфтер ID233150 был установлен в сентябре 2014 г.

В море Бофорта – Канадской котловине траектории дрейфтеров (рис. 2, *а, б*) определялись процессами переноса ледовых образований в круговороте Бофорта (*Beaufort Gyre*). Траектории дрейфтеров ID242970, ID244950, ID245950 (2013 г.) и ID236150 (2014 г.) воспроизводили антициклоническое движение льдов по периферии, дрейфтеров ID238150 и ID239180 (2014 г.) – в центральной части круговорота. Здесь и далее после номера дрейфтера в скобках указан год его развертывания. Дрейфтер ID245960 (2013 г.) смещался в ледовом поле с запада на восток через центральную часть круговорота, а траектория дрейфтера ID242840 (2013 г.) определялась движением льда из центральной части круговорота к его восточной оконечности. Сходство траекторий дрейфтеров ID242970 (2013 г.) и ID236150 (2014 г.) свидетельствует о межгодовой повторяемости характеристик движения ледовых полей в районе дрейфов.

Траектории дрейфтеров *ID242970* и *ID244950* (2013 г.) воспроизводили процессы конвергенции ледовых полей. На начальных участках во второй половине августа дрейфтеры двигались по различным траекториям. Их траектории практически совпали 31 августа. До конца февраля 2014 г., когда дрейфтер *ID244950* прекратил передачу данных, дрейф обоих дрейфтеров определялся движением консолидированного ледового поля.

Начальные участки траекторий дрейфтеров *ID236150* и *ID237170* (2014 г.) иллюстрируют методику их постановки на открытую водную поверхность с последующим вмержанием корпуса дрейфтера и верхней части термолинии в лед. Дрейфтеры были установлены 6 и 14 сентября на свободную от льда поверхность моря и до середины октября дрейфовали в северном направлении. Приблизительно 15 октября оба дрейфтера вмержли в лед и впоследствии двигались уже в ледовых полях.

Наиболее продолжительной из всех оказалась траектория дрейфтера *ID245950* (2013 г.), который на протяжении почти трех лет сохранял работоспособность в полном объеме. Результаты дрейфа более подробно рассматриваются ниже.

В Центральной Арктике (рис. 2, в) траектории дрейфтеров *ID246740*, *ID246950*, *ID247800* (2013 г.) и *ID233150* (2014 г.) определялись процессами трансарктического переноса ледовых полей. При значительном пространственном разнесении первых трех дрейфтеров прослеживается сходство их траекторий, что свидетельствует о влиянии на характеристики дрейфов общих факторов.

Статистический анализ траекторий. Прежде чем перейти к рассмотрению методики и результатов анализа, необходимо сделать пояснения, связанные с особенностями эксплуатации дрейфтеров в полярных условиях. Как уже было сказано, измерения всех параметров и передача данных выполняются в начале каждого часа. Однако в ряде случаев не все данные доставляются пользователю. Пропуски объясняются главным образом экранированием корпуса дрейфтера снегом или (и) слишком большим его наклоном. Последнее возможно при постановке дрейфтера на открытую воду с последующим неконтролируемым вмержанием в лед (дрейфтеры *ID236150* и *ID237170*). Поэтому для получения статистически значимых оценок рассматривались данные только тех дрейфтеров, временные ряды координат которых содержали не более 15% пропусков, а наибольшая продолжительность пропущенных данных не превышала 4 ч. По траекториям, полученным путем линейной интерполяции таких рядов на интервал 1 ч, оценивались статистические характеристики движения ледовых полей.

Статистические характеристики дрейфов рассчитывались по координатам дрейфтеров, измеренным встроенными приемниками *GPS* с погрешностью $\Delta_S \leq 50$ м. При интервале времени между измерениями $\tau = 1$ ч погрешность оценивания скорости дрейфа $\Delta V = \frac{\sqrt{2} \Delta_S}{\tau} \leq 2$ см/с.

На рис. 3, а показана траектория дрейфтера *ID245950*, который был установлен на поверхность воды 30 августа 2013 г. и вмерж в лед к 11 октября. В

течение последующих почти трех лет дрейфтер сохранял работоспособность в полном объеме, что позволило получить уникальные по продолжительности ряды данных о процессах переноса и эволюции ледовых образований, изменчивости атмосферного давления и термической структуре верхнего, в том числе подледного, слоя моря. Ресурс источника питания был исчерпан 16 августа 2016 г., и дрейфтер прекратил передачу данных.

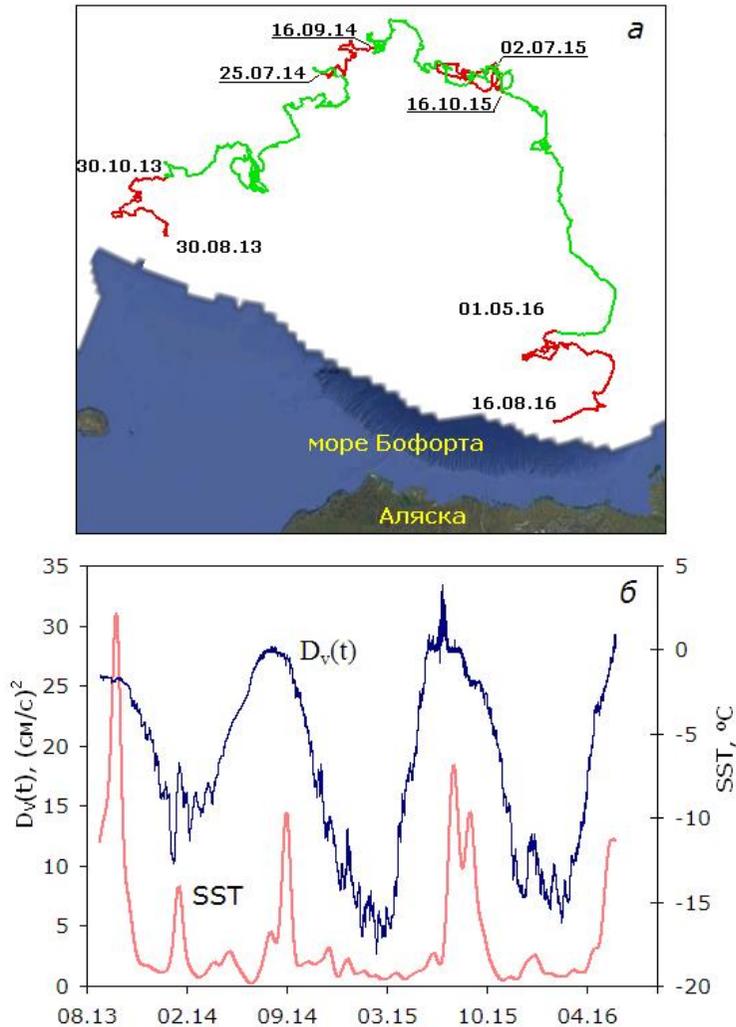


Рис. 3. Траектория (а), скользящая дисперсия $D_v(t)$ скорости дрейфа и температура корпуса SST (б) по данным дрейфтера ID245950. Участки траектории, относящиеся к сезонам «зима», выделены зеленым цветом, к сезонам «лето» – красным. Белым цветом на карте (а) обозначена ледовая обстановка по состоянию на время развертывания – сентябрь 2013 г.

За 1082 сут дрейфтер прошел 8926 км. Средняя скорость дрейфа составила 0,1 м/с, наибольшая – 0,8 м/с (16.07.2016 г., 5:00).

Для последующего анализа временные ряды данных, полученных за все время работы дрейфтера, были разделены на сезонные блоки «зима» и «лето».

Блоки «зима» содержат данные, полученные при дрейфе в ледовом поле с высокой концентрацией льда (сплоченные льды), блоки «лето» – на свободно плавающей льдине либо на открытой воде. Принадлежность данных к тому или иному сезону оценивалась по температуре корпуса дрейфера и скользящей дисперсии $D_v(t)$ высокочастотной составляющей скорости дрейфа. Скользящая дисперсия оценивалась следующим образом. Из временного ряда скорости, рассчитанного по координатам дрейфера, выделялись относительно высокочастотные мезомасштабные флуктуации. Использовался фильтр Баттерворта верхних частот с частотой среза $0,85 f_i$, где f_i – частота инерционных колебаний, номинальное значение которой на рассматриваемом участке дрейфа составляет $\sim 1/12,2$ цикл/ч. Фильтрация выполнялась с помощью реализованной в среде *Matlab* функции *filtfilt*, позволяющей путем двунаправленной обработки сигнала компенсировать фазовый сдвиг, вносимый при обычной фильтрации, т. е. без добавления временной задержки в результат фильтрации. По полученному таким образом временному ряду для «окна» шириной 5 сут со сдвигом 1 ч оценивалась скользящая дисперсия $D_v(t)$ скорости дрейфа. Результаты оценивания показаны на рис. 3, б. Там же показан график временного ряда температуры корпуса дрейфера *SST*.

Предполагалось, что участкам движения дрейфера в ледовом поле с высокой концентрацией льда соответствуют малые значения скользящей дисперсии скорости при температуре корпуса дрейфера ниже $-1,8^\circ\text{C}$ (точка замерзания арктических вод), участкам движения дрейфера на свободно плавающей льдине либо на открытой воде – более высокие значения дисперсии при температуре корпуса выше $-1,8^\circ\text{C}$. На рис. 3, а фрагменты траектории, относящиеся к сезону «лето», выделены красным цветом, к сезону «зима» – зеленым.

Продолжительности рядов данных на всех рассматриваемых участках позволяют статистически значимо оценить характеристики дрейфа в мезомасштабном и синоптическом диапазонах.

Частотная структура флуктуаций составляющих скорости оценивалась по спектральным плотностям мощности (СПМ), которые рассчитывались по методу осреднения модифицированных периодограмм, или методу Уэлча. Исходный временной ряд данных разбивался на перекрывающиеся сегменты, и данные каждого полученного сегмента умножались на оконную функцию Парзена. Для взвешенных таким образом сегментов вычислялись модифицированные периодограммы. Полученная оценка СПМ представляет собой результат осреднения периодограмм всех сегментов. Такой метод обеспечивает получение гладких и статистически устойчивых оценок по конечному ряду данных. Оценивание СПМ выполнялось по программе, реализованной в среде *Matlab* с помощью функции *pwelch*.

При оценивании СПМ в мезомасштабном диапазоне изменчивости необходимо учитывать, что частоты инерционных колебаний на широтах дрейфа сопоставимы с частотой f_s полусуточных приливных колебаний и разрешить их даже при малых значениях степени свободы проблематично. Различие между этими двумя типами колебаний можно установить с помощью метода вращательных компонент. Метод позволяет разделить вектор скорости на составляющие направлений вращения по и против часовой стрелки. Первым

соответствуют отрицательные, вторым – положительные частоты. Спектральные плотности мощности этих составляющих рассчитывались с применением преобразования Фурье по формуле

$$P(f) = \frac{1}{N} \left\{ \sum_{t=t_0}^{t_1-\Delta t} e^{-i2\pi ft} [u(t) + iv(t)] \right\}^2,$$

где N – количество отсчетов координат на интервале времени $t_0 - t_1$; Δt – дискретность отсчетов; f – частота; $u(t)$, $v(t)$ – составляющие скорости по данным дрейфа на том же интервале времени.

Рассчитанные по этой формуле для участка траектории дрейфера ID245950 за период 16.09.2014 г. – 02.07.2015 г. (рис. 3, а) СПМ $P_{cw}(-f)$ и $P_{ccw}(f)$ составляющих вектора скорости, соответствующих направлениям вращения по и против часовой стрелки, показаны на рис. 4.

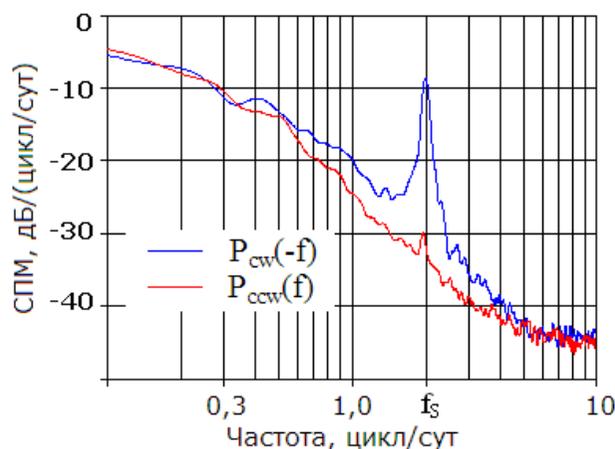


Рис. 4. Графики СПМ $P_{cw}(-f)$ и $P_{ccw}(f)$ составляющих вектора скорости по данным дрейфера ID245950 на участке траектории, показанной на рис. 3, а (16.09.2014 г. – 02.07.2015 г.), $f_S = 2$ цикл/сут

Графики СПМ построены относительно модуля частоты f и содержат два статистически значимых локальных максимума. Максимум на отрицательной частоте 2 цикл/сут обусловлен как инерционными колебаниями, частота которых на средней широте рассматриваемого участка дрейфа составляет ~1,98 цикл/сут, так и полусуточными приливными колебаниями. Максимум на положительной частоте 2 цикл/сут, мощность которого на 20 дБ меньше максимума на отрицательной частоте, обусловлен только приливными колебаниями. Полагая независимость мощности максимумов приливных колебаний от знака частоты, можно предположить, что максимум на отрицательной частоте обусловлен главным образом энергией инерционных колебаний. Приведенные ниже оценки СПМ составляющих скорости дрейфа получены в этом предположении.

Долговременные ряды координатных измерений дрейферов позволяют статистически значимо оценить межсезонную и межгодовую изменчивость

энергетических характеристик дрейфа. Для оценивания синоптической изменчивости высокочастотных колебаний скорости вся траектория дрейфа разбивалась на ежемесячные фрагменты, по которым рассчитывались ежемесячные оценки СПМ составляющих скорости дрейфа. При расчетах спектральных характеристик временные ряды разбивались на 6 перекрывающихся сегментов. Коэффициент перекрытия сегментов составлял 50%. В результате для каждого месяца были получены статистически значимые оценки СПМ, доверительные интервалы которых при степени свободы 20 с вероятностью 0,95 лежат в пределах $(0,36 - 0,84) \cdot \text{СПМ}$.

Ежемесячные энергетические характеристики дрейфа в мезомасштабном диапазоне изменчивости сопоставлялись по параметру $\eta = S(f_i)/S(f_L)$ – отношение амплитуды локального максимума СПМ вблизи инерционной частоты f_i к значению СПМ на частоте $f_L = 0,8f_i$. Результаты расчетов по данным дрейфера ID245950 приведены на рис. 5.

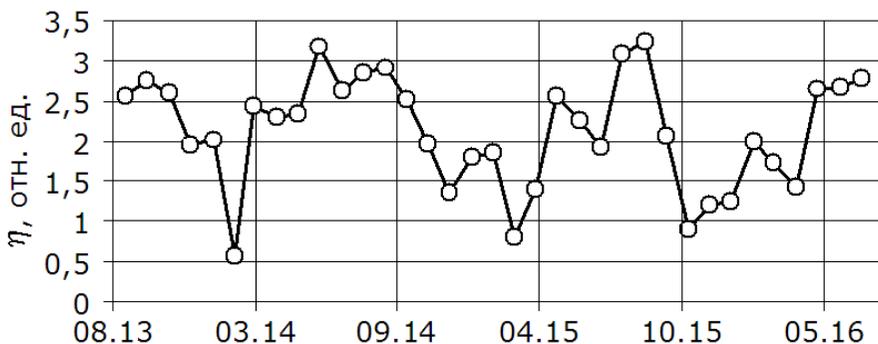


Рис. 5. Временной ряд параметра η по данным дрейфера ID245950 (пояснения в тексте)

Из графика видно, что мезомасштабная изменчивость энергетических характеристик движения дрейфера имеет явно выраженную сезонную зависимость, а параметр η можно рассматривать как количественный показатель, характеризующий степень сплоченности ледовых образований.

Для выделения синоптических компонентов временные ряды координат подвергались фильтрации с использованием фильтра Баттерворта нижних частот с частотой среза 0,2 цикл/сут. Фильтрация выполнялась так же, как описано выше. По «синоптической» траектории дрейфера (рис. 6, а), полученной в результате такой фильтрации, были рассчитаны расстояния, которые ежемесячно проходил дрейфер без учета высокочастотных циркуляций. Временная изменчивость таких расстояний показана на рис. 6, б.

Как видно из графика, минимальные ежемесячные расстояния в синоптическом масштабе изменчивости были зафиксированы в марте 2014 г. (29 км/мес), октябре 2014 г. (20 км/мес), марте 2015 г. (15 км/мес) и в июне 2016 г. (26 км/мес). Мартовские минимумы объясняются условиями дрейфа в сплоченном ледовом поле, а октябрьский и июньский – значительным вкладом в траекторию дрейфа циркуляций мезомасштабного диапазона, что подтверждается высокими значениями параметра η для этих месяцев (рис. 5).

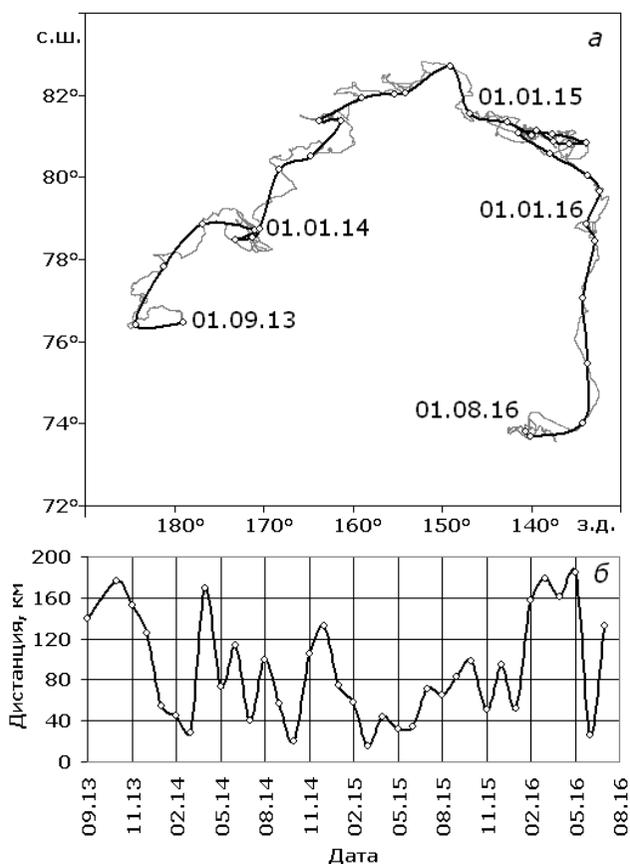


Рис. 6. Траектории дрейфера *ID245950* до (тонкая линия) и после (жирная линия с маркерами) низкочастотной фильтрации (*а*) и временной ряд ежемесячных расстояний по траектории после низкочастотной фильтрации (*б*). Временной интервал между маркерами – 1 мес

Сведения о дрейферном эксперименте 2013 – 2015 гг. в Центральной Арктике

Номер дрейфера	Дрейф			Относительное количество принятых сообщений, %	Скорость, м/с	
	начало	окончание	продолжительность/дистанция, сут/км		средняя	среднее квадратическое отклонение
<i>ID246740</i>	30.08.13	14.10.14	410/4234	99,4	0,12	0,08
<i>ID246950</i>	03.09.13	15.12.14	468/3237	98,3	0,08	0,06
<i>ID247800</i>	07.09.13	23.01.15	503/5643	99,4	0,13	0,09
<i>ID233150</i>	02.09.14	29.07.15	331/2316	98,5	0,08	0,07

В таблице приведены статистические сведения об эксперименте 2013 – 2015 гг. в Центральной Арктике (траектории дрейферов показаны на рис. 2, в). С точки зрения обеспечения эффективности наблюдений следует обратить внимание на графу «продолжительность/дистанция». Сопоставительный анализ показывает, что по представительности временных рядов систематических оперативных данных мониторинга эффективность применения

«ледовых» дрейфтеров *BTC60/GPS/ice* существенно выше любых современных контактных средств исследования полярных регионов. В таблице также приведены оценки надежности каналов передачи данных: пользователям поступило не менее 98% результатов измерений, выполнявшихся с интервалом 1 ч. Это относится и к результатам измерений координат дрейфтеров по данным встроенных приемников *GPS*, что позволило статистически значимо оценить лагранжевые характеристики дрейфов ледовых полей.

Наблюдения термической структуры верхнего подледного слоя океана. Очевидным следствием аномального, по данным наблюдений в последние годы, прогрева верхнего слоя (0 – 60 м) Северного Ледовитого океана является уменьшение площади и толщины морского льда, которое в свою очередь приводит к большему прогреву атмосферы и переносу более теплых субарктических вод в приполярные регионы [10 – 12]. Достоверность модельных прогнозов такой ситуации в значительной степени определяется уровнем развития системы наблюдений термических процессов в верхнем слое океана. Широко используемые для решения задач мониторинга окружающей среды дистанционные методы наблюдений требуют валидации по данным контактных измерений и не позволяют контролировать подледный слой океана. По понятным причинам также не может быть реализована с необходимым пространственно-временным разрешением сеть обитаемых дрейфующих станций типа «Северный полюс».

В рамках упомянутого выше проекта *UpTempO* задача оперативного систематического мониторинга термических процессов в верхнем подледном слое океана решается путем применения дрейфтеров типа *BTC60/GPS/ice*.

Среди наиболее интересных результатов термопрофилирования верхнего слоя Северного Ледовитого океана – долговременные ряды данных о пространственно-временной изменчивости такой структурной особенности слоя, как подповерхностный максимум температуры, механизмы формирования и сезонные эволюции которого остаются малоизученными [13, 14]. На рис. 7 показаны результаты дрейферного мониторинга вертикального распределения температуры в верхнем слое океана в районе Северного полюса по данным дрейфтера *ID246740* (траектория дрейфа приведена на рис. 2, в). Пояснения на рис. 7 заимствованы из [15].

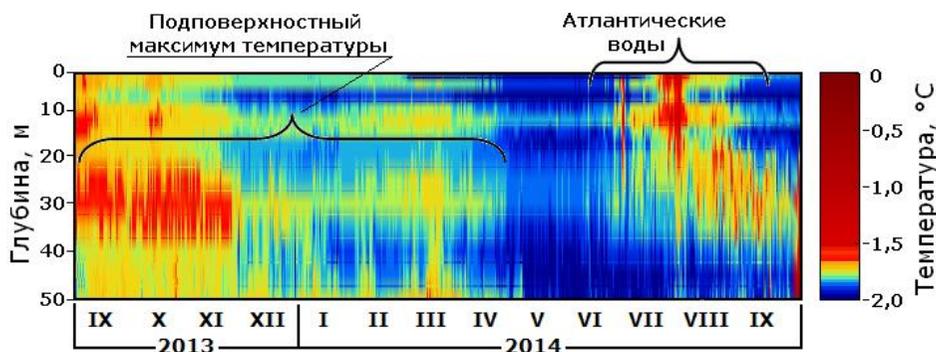


Рис. 7. Термическая структура подледного слоя океана в районе Северного полюса по данным дрейфтера *ID246740* (сентябрь 2013 г. – октябрь 2014 г.)

Подповерхностный максимум температуры хорошо прослеживался осенью – зимой 2013 г. и весной 2014 г. Средняя глубина оси максимума за время наблюдения оставалась стабильной и составляла ~30 м.

Результаты, полученные в течение многолетнего дрейферного мониторинга в Арктике, позволяют уточнить современные представления о генезисе и эволюции подповерхностного максимума температуры, сезонных изменениях теплосодержания поверхностного слоя [10].

В ряде случаев данные термопрофилирования дают возможность оценить толщину льда и ее пространственно-временную изменчивость. На рис. 8, *а* показаны участки траекторий дрейферов ID246740 и ID247800 в Центральной Арктике. На графиках рис. 8, *б*, построенных по результатам измерений температуры на верхних горизонтах термолиний указанных дрейферов, хорошо видны области с температурами ниже $-1,8^{\circ}\text{C}$. Судя по термической изменчивости, толщина льда на отмеченных маркерами участках дрейфов достигала 4 – 5 м. Динамические характеристики процессов льдообразования могут быть получены с привлечением результатов измерений траекторий дрейферов по данным встроенных приемников GPS.

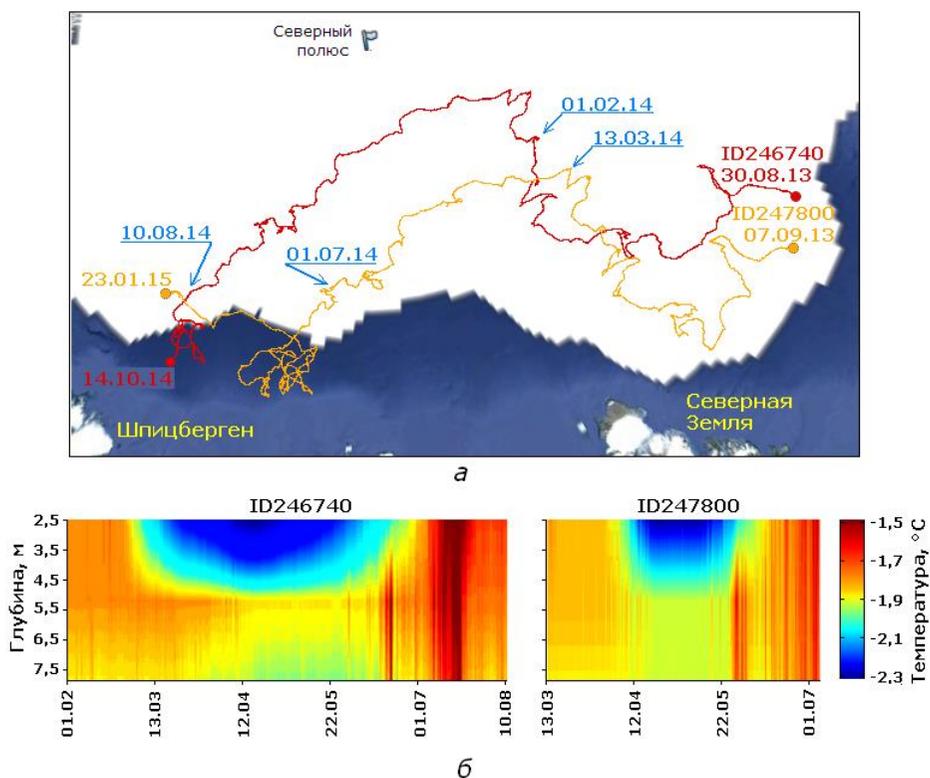


Рис. 8. Результаты оценивания толщины льда по данным измерений температуры на верхних горизонтах термолиний дрейферов ID246740 и ID247800: *а* – траектории дрейфов; *б* – временные ряды профилей температуры. Стрелками отмечены участки траекторий, соответствующие по времени рядам профилей температуры

Выводы. Результаты приведенного анализа следует рассматривать как предварительные. Тем не менее они убедительно свидетельствуют о создании эффективного автономного средства долговременного оперативного мониторинга динамики ледовых полей, термических процессов в верхнем, в том числе подледном, слое океана, полей атмосферного давления. Термопрофилирующие дрейфтеры типа *BTC60/GPS/ice* могут рассматриваться как базовое средство надежной и экономной системы наблюдений полярных регионов океана. В качестве сегмента системы освещения обстановки в Арктике дрейфтерная наблюдательная сеть позволит: повысить безопасность судоходства и функционирующих на арктическом шельфе нефтедобывающих платформ; обеспечить валидацию данных, получаемых дистанционными методами; повысить достоверность моделирования гидрофизических полей; снизить вероятность ошибочных метеопрогнозов и прогнозов ледовой обстановки; уточнить и даже изменить существующие представления о характере взаимодействия системы атмосфера – лед – океан в Арктическом бассейне.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2014-0011 «Исследования закономерностей изменений состояния морской среды на основе оперативных наблюдений и данных системы диагноза, прогноза и реанализа состояния морских акваторий» (шифр «Оперативная океанография»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Писарев С.В.* Опыт применения автоматических дрейфующих устройств для исследования водной толщи и ледового покрова Арктики в начале XXI в. // Арктика: экология и экономика. – 2012. – № 4. – С. 66 – 75.
2. <http://geographyofrussia.com/polyarnye-stancii-rossijskogo-sektora-arktiki/> (дата обращения 25.05.2016 г.).
3. *Sybrandy A.L.* Global drifter program. Barometer drifter design reference [Электронный ресурс] // DBCP Report. – August, 2009. – No. 4. – <http://www.jcommops.org/dbcp/community/standards.html> (дата обращения 09.02.2015 г.).
4. *Толстошеев А.П., Лунев Е.Г., Мотыжев С.В.* Анализ результатов натуральных экспериментов с термопрофилирующими дрейфующими буями в Черном море и других районах Мирового океана // Морской гидрофизический журнал. – 2014. – № 5. – С. 9 – 32.
5. *Ракович Н.Н.* Основы построения сетей *MicroLAN* // Chip News. – 2000. – № 6. – С. 14 – 17.
6. *Меркин Д.Р.* Введение в механику гибкой нити. – М.: Наука, 1980. – 240 с.
7. <http://psc.apl.washington.edu/UpTempO/UpTempO> (дата обращения 14.12.2016 г.).
8. *Баянкина Т.М., Литвиненко С.Р., Крыль М.В., Юркевич Н.Ю.* База данных оперативных дрейфтерных наблюдений по Арктическому региону // Морской гидрофизический журнал (наст. издание). – С.69 – 79.
9. *Мотыжев С.В., Лунев Е.Г., Толстошеев А.П.* Опыт применения барометрических дрейфтеров для исследований Арктического региона Мирового океана // Морской гидрофизический журнал. – 2016. – №. 4. – С. 53 – 63.
10. *Steele M., Ermold W., Zhang J.* Modeling the formation and fate of the near-surface temperature maximum in the Canadian Basin of the Arctic Ocean // J. Geoph. Res. – 2011. – 116. – C11015. – doi:10.1029/2010JC006803.

11. *Алексеев Г.В., Пнюшков А.В., Иванов Н.Е. и др.* Комплексная оценка климатических изменений в морской Арктике с использованием данных МПГ 2007/08 // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2009. – № 1. – С. 7 – 14.
12. *Steele M., Dickinson S.* The phenology of Arctic Ocean surface warming // J. Geoph. Res. – 2016. – 121. – doi:10.1002/2016JC012089.
13. *Jackson J.M., Carmack E.C., McLaughlin F.A. et al.* Identification, characterization, and change of the near-surface temperature maximum in the Canada Basin, 1993 – 2008 // Ibid. – 2010. – 115. – C05021. – doi:10.1029/2009JC005265.
14. *Якшина Д.Ф., Голубева Е.Н.* Исследование механизмов формирования подповерхностного максимума температуры в Канадском бассейне Северного Ледовитого океана // Международная научная конференция «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология». – Новосибирск: СГУГиТ, 2016. – Т. 1. – С. 125 – 129.
15. http://research.iarc.uaf.edu/NABOS2/pubs/Arlington_Workshop_April_2014.pdf (дата обращения 14.12.2016 г.).

Experience of using autonomous drifters to study the ice fields and the ocean upper layer in the Arctic

S.V. Motyzhev, E.G. Lunev, A.P. Tolstosheev

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
e-mail: smotyzhev@mail.ru*

Design philosophy and running features of the temperature-profiling drifting buoys BTC60/GPS/ice developed in Marine Hydrophysical Institute, RAS, and intended for application in the Arctic region are considered. Being statistically analyzed, the long-term *in situ* drifter experiments in the Arctic constitute a ground for drawing a conclusion on possibility and expediency of constructing a reliable, technically and financially feasible drifter network (based on the BTC60/GPS/ice buoys) in the Arctic zone of the World Ocean.

Keywords: temperature-profiling drifter, ice field, temperature profile, ocean upper layer, Arctic observations.