

## Опыт применения термопрофилирующих дрейфтеров для исследований арктического региона Мирового океана

С. В. Мотыжев<sup>1</sup>, доктор технических наук,  
Е. Г. Лунев<sup>2</sup>, кандидат технических наук,  
А. П. Толстошеев<sup>3</sup>, кандидат технических наук,  
Е. М. Быков<sup>4</sup>  
ФГБУН Морской гидрофизический институт, Севастополь

*Приведены результаты разработки автономного термопрофилирующего дрейфтера, ориентированного на исследования полярных регионов Мирового океана. На основании анализа данных долговременных натурных экспериментов сделан вывод о возможности построения надежной и экономичной системы наблюдений полярных регионов с помощью дрейфтеров.*

**Ключевые слова:** дрейфтер, профиль температуры, верхний слой океана, арктические наблюдения.

### Примеры внедрения дрейфтерной технологии в практику полярных и приполярных исследований

Освоение полярных и приполярных регионов является одной из наиболее приоритетных задач современности, эффективность решения которой непосредственно определяется уровнем развития системы комплексных наблюдений метеорологической, гидрологической и ледовой обстановки. Анализ состояния проблемы посвящено большое количество публикаций, смысл которых в данном контексте коротко и исчерпывающе изложен в [1]. Систематизируя имеющиеся данные по изучению Арктики, автор статьи приходит к следующим выводам:

1. «Несмотря на то, что существуют различные обоснованные мнения о причинах и возможной продолжительности современного потепления Арктики... данные изменения в сочетании с другими экономическими и политическими обстоятельствами... взрывным образом усилили международный интерес к этому труднодоступному региону».

2. «...В январе 2010 г. автор настоящей статьи обнаружил только по ключевым словам в Интернете 48 существующих и 12 планируемых национальных и международных сетей наблюдений, имеющих отношение к Арктике, а также 30 обсерваторий, 25 центров данных и информационных порталов и 24 организационных комитета. Работа 75—80% этих

структур пока явно не приводит к проведению новых измерений или получению новых знаний на основе анализа прежних экспедиционных работ. Это косвенно свидетельствует о том, что хотя исследование в Арктике с различными целями чрезвычайно актуально, их практическая реализация остается делом технически и организационно непростым и дорогостоящим».

За прошедшие с 2010 г. пять лет наметилась тенденция к изменению ситуации в лучшую сторону. В определенной степени это связано с работами ФГБУН Морской гидрофизический институт (МГИ) и ООО «Марлин-Юг» (Севастополь) по созданию и внедрению дрейфтерной технологии в практику полярных и приполярных исследований. Первые шаги в этом направлении были сделаны в 2008 г.: четыре маркера с приемниками GPS и передачей данных по каналам спутниковой системы «Argos» были развернуты на ледяных полях шельфа острова Сахалин. Значимым для последующих разработок стало создание барометрического маркера со встроенным приемником GPS. В 2010 г. такой маркер был доставлен пешим путем на Северный полюс японским путешественником. Результаты долговременной эксплуатации в полярных условиях подтвердили надежность конструктивных, схемотехнических и алгоритмических решений, реализованных в маркере. Показательны в этом плане результаты сопоставления данных об атмосферном давлении и траекторий дрейфов по данным приемников GPS барометрического маркера МГИ ID 52494 и канадской профилирующей системы POPS (Polar Ocean Profiling System), которые в апреле 2010 г. были

<sup>1</sup> e-mail: motyzhev@marlin-yug.com.

<sup>2</sup> e-mail: lunev@marlin-yug.com.

<sup>3</sup> e-mail: tolstosheev1953@mail.ru.

<sup>4</sup> e-mail: bykov@marlin-yug.com.

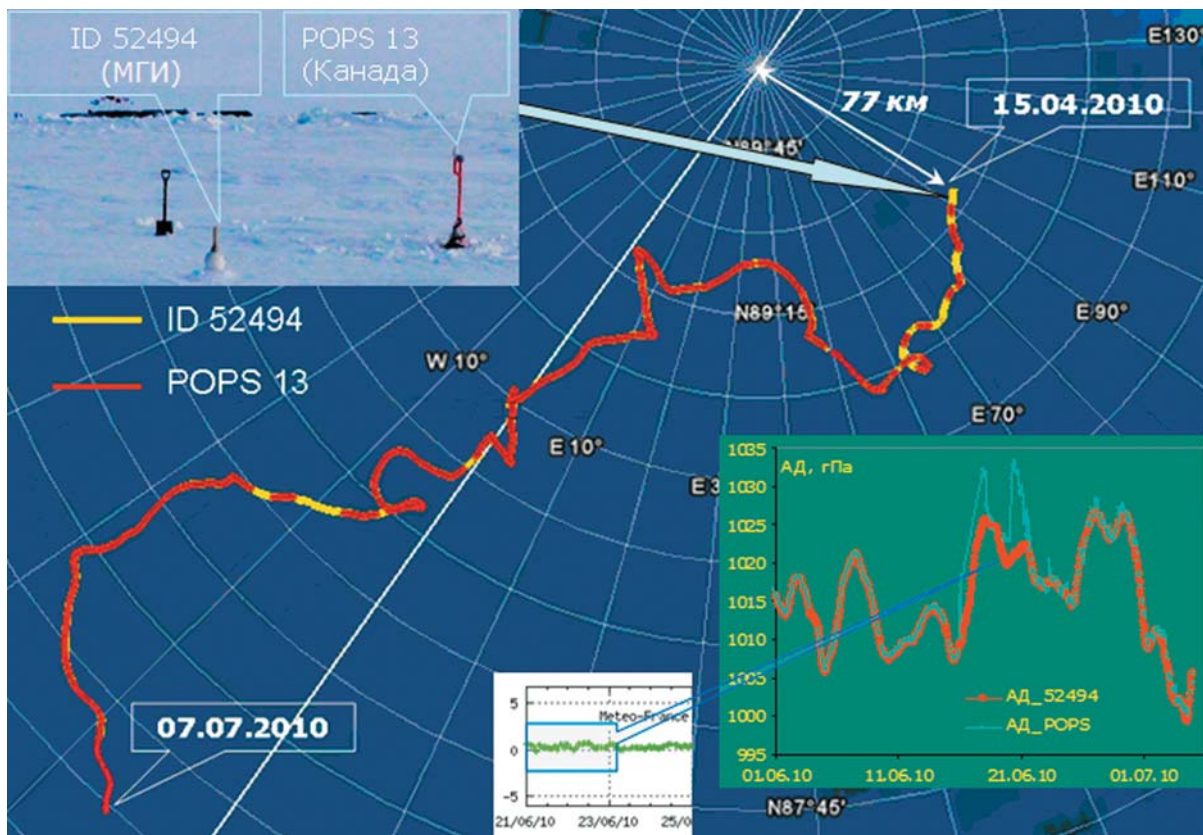


Рис. 1. Дрейф ледяных полей по данным барометрического маркера ID 52494 (МГИ) и профилирующей системы POPS (Канада)

установлены в 77 км от Северного полюса на расстоянии нескольких метров друг от друга. Как видно из траекторий и графиков на рис. 1, маркер ID 52494 сохранял работоспособность в течение всего периода дрейфа, в то время как в результатах измерений координат и атмосферного давления системой POPS наблюдались сбои. Следует отметить, что в настоящее время фирма «MetOcean» (Канада) эксклюзивно представляет дрейфтеры МГИ и ООО «Марлин-Юг» на североамериканском рынке.

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.

Наиболее масштабным в смысле применения таких средств в Арктике оказался проект Вашингтонского университета «UpTempO» [7]. Цель проекта — исследование изменчивости температуры верхнего слоя океана, в том числе под ледяными образованиями. Начиная с 2012 г. измерительно-информационная поддержка проекта обеспечивается главным образом разработанными в МГИ специализированными «ледовыми» термопрофилирующими дрейфтерами типа BTC60/GPS/ice. «Ледовый»

дрейфтер, структура которого показана на рис. 2а, представляет собой модификацию разработанного в 2004 г. термопрофилирующего квазилагранжевого дрейфтера [2]. В сферическом корпусе дрейфтера диаметром 41 см расположены измерительный модуль, приемник GPS, модем системы спутниковой связи «Iridium», баропорт канала измерения атмосферного давления, элементы питания. К нижней части корпуса подсоединена термолития длиной 60 м и диаметром 13 мм, в которую интегрированы датчики температуры и гидростатического давления.

В базовом варианте дрейфтера BTC60/GPS/ice с интервалом 1 ч измеряются атмосферное давление, температура воды T1—T17 на номинальных горизонтах, указанных в скобках на рис. 2а; гидростатическое давление P1—P3 на номинальных горизонтах 20, 40 и 60 м, координаты. Данные передаются по каналу связи системы «Iridium» и поступают пользователю через несколько минут после измерений.

В Арктике в 2012—2015 гг. было развернуто более 30 дрейфтеров типа BTC60/GPS/ice, общее время жизни которых по состоянию на июль 2015 г. превысило 6500 сут. По данным дрейфтеров было получено более 155 тыс. профилей температуры, в том числе под ледовыми образованиями. Наиболее интенсивно дрейфтерные наблюдения проводились в двух регионах: море Бофорта (Канадская котловина)

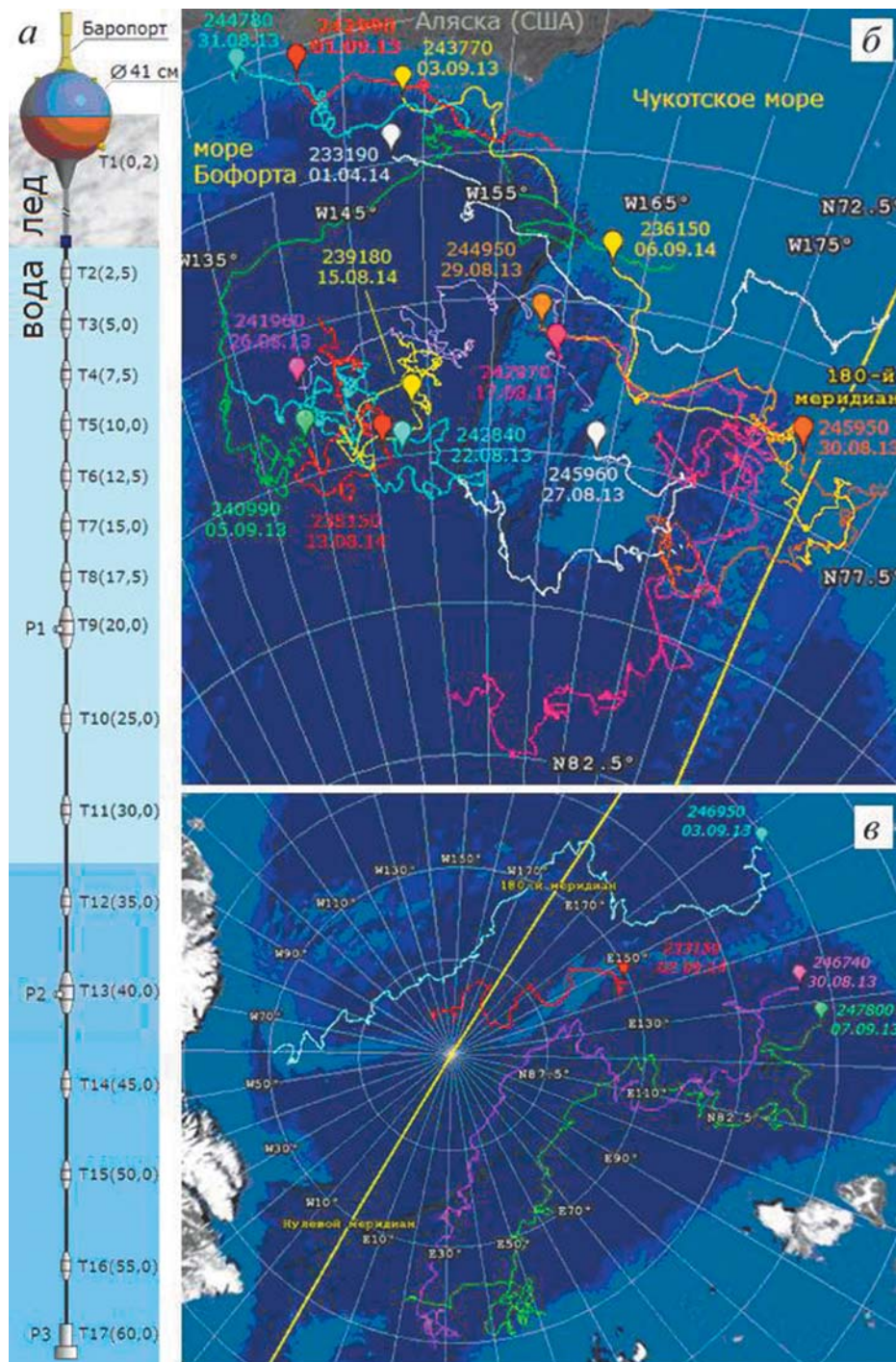


Рис. 2. Структура «ледового» термопрофилирующего дрейфера типа ВТС60/GPS/ice (а). Траектории «ледовых» термопрофилирующих дрейферов ВТС60/GPS/ice, развернутых в арктическом регионе в 2012–2014 гг.: море Бофорта – Канадская котловина (б), Центральная Арктика (в)

и Центральная Арктика. Траектории дрейфов в этих регионах показаны на рис. 2б и 2в.

В Канадской котловине было развернуто 15 термопрофилирующих дрейферов, общая продолжительность дрейфов которых по состоянию на июль 2015 г. составляла более 2000 сут, в Центральной Арктике — 5 дрейферов и более 1800 сут соответственно.

Полярные эксперименты показали надежность эксплуатационных характеристик дрейферов ВТС60/GPS/ice. По продолжительности автономной безотказной работы (рис. 3) и долговременной стабильности метрологических характеристик каналов измерения температуры

(табл. 1, данные предоставлены Кристиной Колбурн (Вашингтонский университет, США); в графе «Дрейфер» указаны обозначения дрейферов в рамках проекта «UpTempO» [7]) эти устройства превосходят аналогичные измерительные средства других производителей — «MetOcean» (Канада) и «Pacific Gyre» (США).

### Наблюдения термической структуры верхнего подледного слоя океана

Очевидным следствием аномального по данным наблюдений в последние годы прогрева верхнего слоя (от 0 до 60 м) арктического 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 (см., например, [6]). 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 BTC60/GPS/ice. Поскольку детальный анализ полученных данных выходит за рамки настоящей статьи, ниже рассматриваются лишь некоторые результаты мониторинга, поясняющие возможности термопрофилирования верхнего слоя океана в арктическом регионе с помощью этих устройств.

Конструкция дрейфтеров обеспечивает возможность их постановки как на лед, так и на открытую водную поверхность с последующим вмержанием корпуса дрейфтера и части термолинии в лед.

Дрейфтер IMEI 236150 был возвращен на свободной ото льда водной поверхности 6 сентября

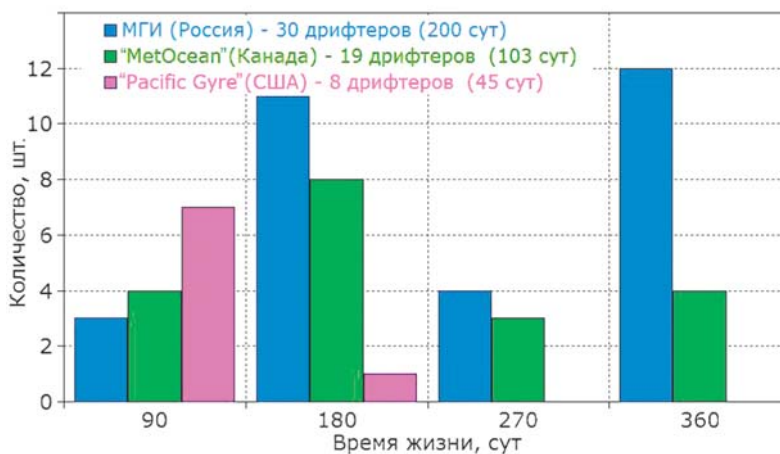


Рис. 3. Время жизни «ледовых» термопрофилирующих дрейфтеров разных производителей в полярных экспериментах 2012–2015 гг. В скобках указаны средние значения

Таблица 1. Сопоставление результатов измерений температуры термопрофилирующими дрейфтерами разных производителей с данными контрольных зондирований

Производитель	Дрейфтер	Смещение, °С	СКО, °С
МГИ / ООО «Марлин-Юг» (Россия)	«Aplis 1»	0,01	0,04
	«Aplis 2»	0,01	0,03
	«Araon 5»	-0,04	0,05
	«Araon 8»	-0,12	0,06
	«Mirai 13»	0,02	0,03
	«Mirai 14»	-0,02	0,13
	«Mirai 15»	-0,09	0,14
	Среднее	-0,02	0,07
«MetOcean» (Канада)	«Amundsen 9»	-0,19	0,07
	«Amundsen 10»	-0,23	0,07
	Среднее	-0,21	0,07
«Pacific Gyre» (США)	SIZRS 3	0,24	0,20
	SIZRS 4	0,13	0,10
	SIZRS 6	0,16	0,20
	«Oceanside»	0,00	0,07
	Среднее	0,13	0,14

2014 г. в районе Чукотского плато (рис. 4а). На рис. 4б показаны профили температуры, полученные с дискретностью 1 ч.

В течение первого месяца дрейфа наблюдалось выхолаживание слоя выше 30 м и ослабление термической стратификации. К 6 октября температура до глубины 25 м упала почти до точки замерзания. Впоследствии толщина слоя с температурами, близкими к точке замерзания, увеличивалась вплоть до наибольшей глубины наблюдений. Падение температуры 6 октября происходило на фоне резкого изменения траектории дрейфа. В это же время в принимаемых по каналу

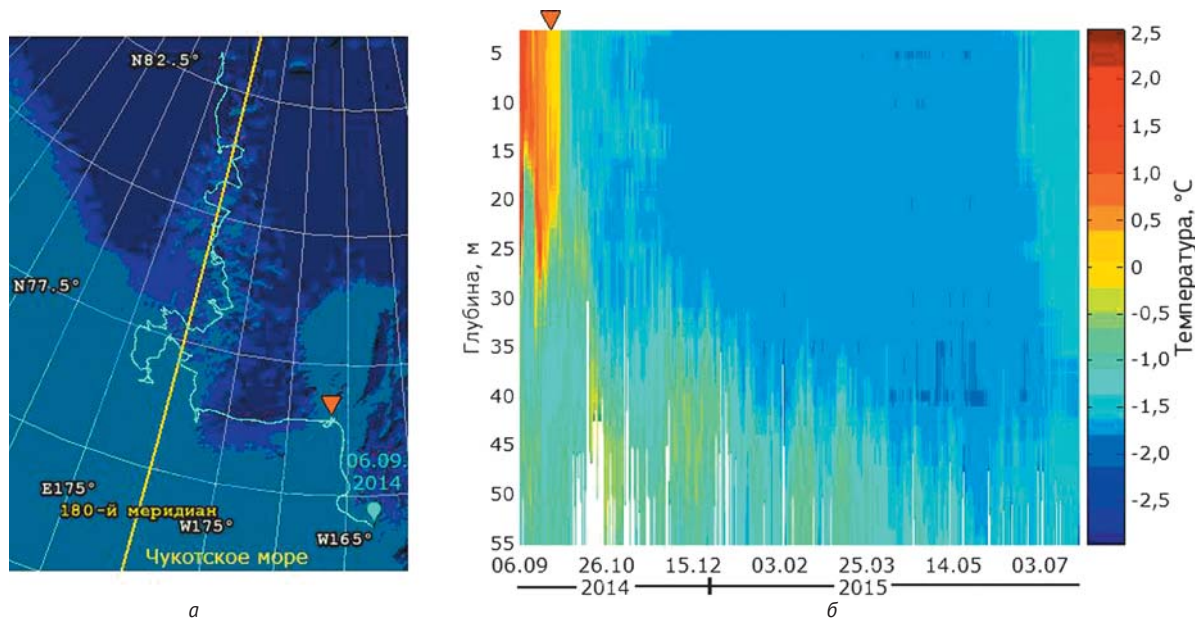


Рис. 4. Траектория (а) и вертикальное распределение температуры (б) по данным дрейфера IMEI 236150, развернутого 6 сентября 2014 г. Оранжевыми маркерами отмечены положение дрейфера и распределение температуры на 6 октября 2014 г.

спутниковой связи сообщениях от дрейфера начали появляться пропуски. Последнее обстоятельство с большой вероятностью может быть связано с вморзанием корпуса дрейфера в лед и с ухудшением вследствие этого условий радиосвязи дрейфера со спутниками. В таком состоянии корпус дрейфера находился до 25 июня 2015 г., когда, судя по показаниям датчика температуры, расположенного в корпусе дрейфера, начался интенсивный прогрев и, возможно, подтаивание поверхности льда. Начиная с этой даты температура корпуса не опускалась ниже нуля, а ее флуктуации имели явно выраженный суточный характер.

14 сентября 2014 г. приблизительно в том же районе, что и дрейфер IMEI 236150, были развернуты еще два — IMEI 235320 и IMEI 237170. Траектории их движений были схожи с участком траектории

дрейфера IMEI 236150 до 6 октября, и примерно в это же время возникли проблемы с получением данных от всех трех дрейферов. Это также может служить подтверждением вморзания дрейферов в лед. К сожалению, в отличие от IMEI 236150 дрейферы IMEI 235320 и IMEI 237170 вскоре после предполагаемого контакта со льдом прекратили передачу данных. Эти обстоятельства послужили основанием для внесения изменений в конструкцию корпусов дрейферов, используемых для исследований полярных регионов. В 2015 г. был разработан «ледовый» дрейфер с конусообразным корпусом, натурные испытания которого предполагается провести в 2016 г.

Среди наиболее интересных результатов термопрофилирования верхнего слоя полярного океана — долговременные ряды данных о пространственно-

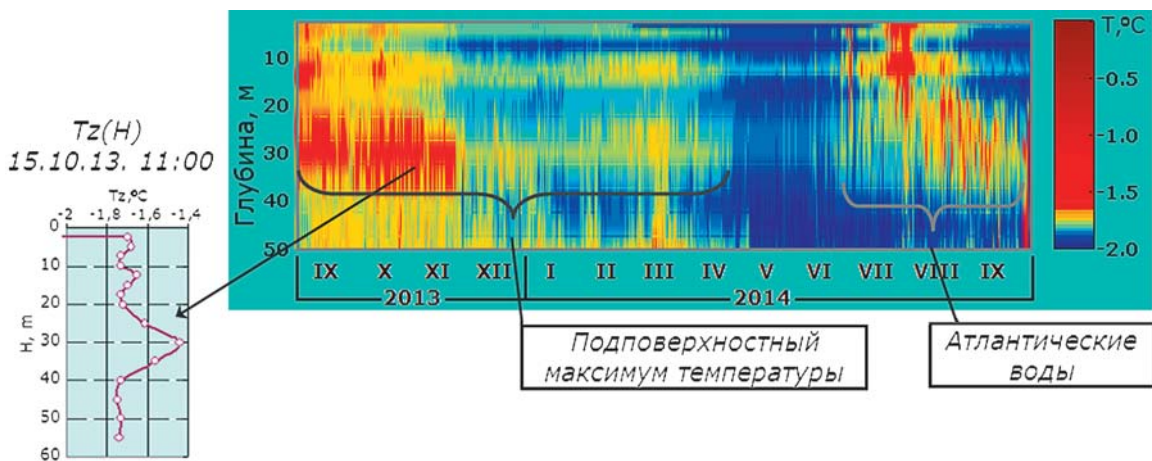


Рис. 5. Термическая структура подледного слоя океана в районе Северного полюса по данным дрейфера IMEI 246740 (сентябрь 2013 г. – октябрь 2014 г.)

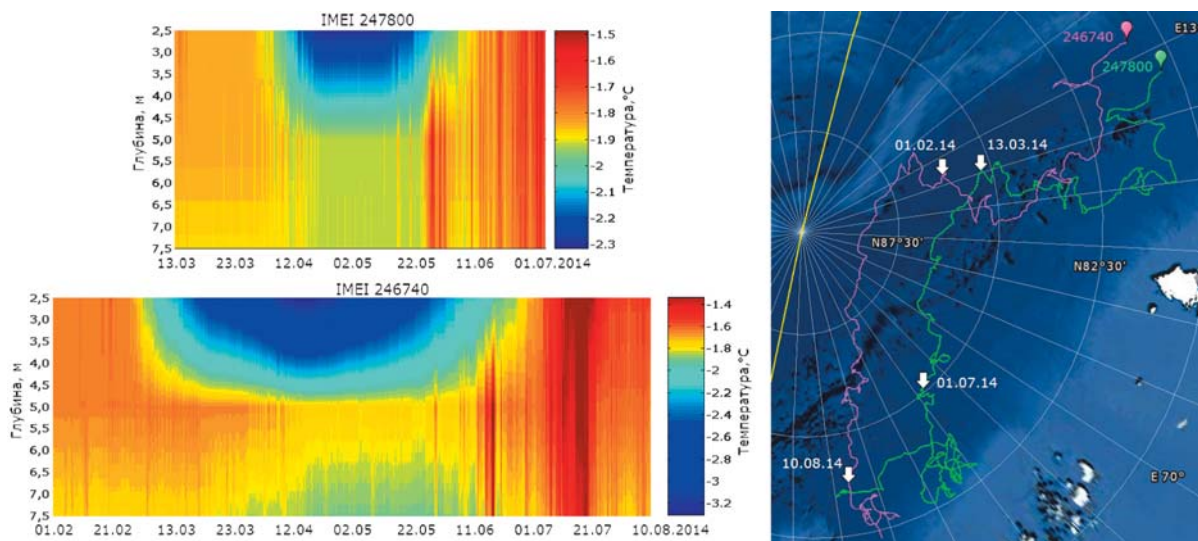


Рис. 6. Оценивание толщины льда по результатам измерений температуры (слева) на верхних горизонтах термолиний дрейфтеров IMEI 247800 и IMEI 246740. На траекториях (справа) соответствующие участки отмечены маркерами белого цвета

временной изменчивости такой структурной особенности верхнего подледного слоя океана, как подповерхностный максимум температуры, механизмы формирования и сезонные эволюции которого мало изучены [4]. На рис. 5 показаны результаты дрейфтерного мониторинга вертикального распределения температуры в верхнем слое океана в районе Северного полюса по данным дрейфтера IMEI 246740 (траектория дрейфа показана на рис. 2в).

Подповерхностный максимум температуры хорошо прослеживался в течение осени-зимы 2013 г. и весны 2014 г. Средняя глубина оси максимума за время наблюдения оставалась стабильной и составляла около 30 м. На рис. 5 слева приведено характерное для осеннего периода наблюдений вертикальное распределение температуры по данным измерений на 11 часов 15 октября. Полученные результаты позволяют уточнить современные представления о генезисе и эволюции подповерхностного максимума температуры, сезонных изменениях теплосодержания поверхностного слоя (см., например, [5]).

В ряде случаев данные термопрофилирования дают возможность оценить толщину льда и ее пространственно-временную изменчивость. Так, на графиках, приведенных на рис. 6а и 6б, построенных по результатам измерений температуры на верхних горизонтах термолиний дрейфтеров IMEI 246740 и IMEI 247800 (соответствующие участки траекторий показаны на рис. 6в), хорошо видны области с температурами ниже  $-1,8^{\circ}\text{C}$  (точки замерзания арктических поверхностных вод).

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 дрейфтеров по данным встроенных приемников GPS.

Рассмотренные здесь некоторые результаты арктических экспериментов показывают, что автономные термопрофилирующие «ледовые» дрейфтеры являются эффективным инструментом исследований полярного океана. Полученные в ходе экспериментов

Таблица 2. Сведения о дрейфтерном эксперименте 2013—2015 гг. в центральной Арктике

IMEI	Дрейф					Относительное количество принятых сообщений, %
	Начало	Окончание	Продолжительность/дистанция, сут/км	Скорость, м/с		
				средняя	среднее квадратическое отклонение	
246740	30.08.13	14.10.14	410/4234	0,12	0,08	99,4
246950	03.09.13	15.12.14	468/3237	0,08	0,06	98,3
247800	07.09.13	23.01.15	503/5643	0,13	0,09	99,4

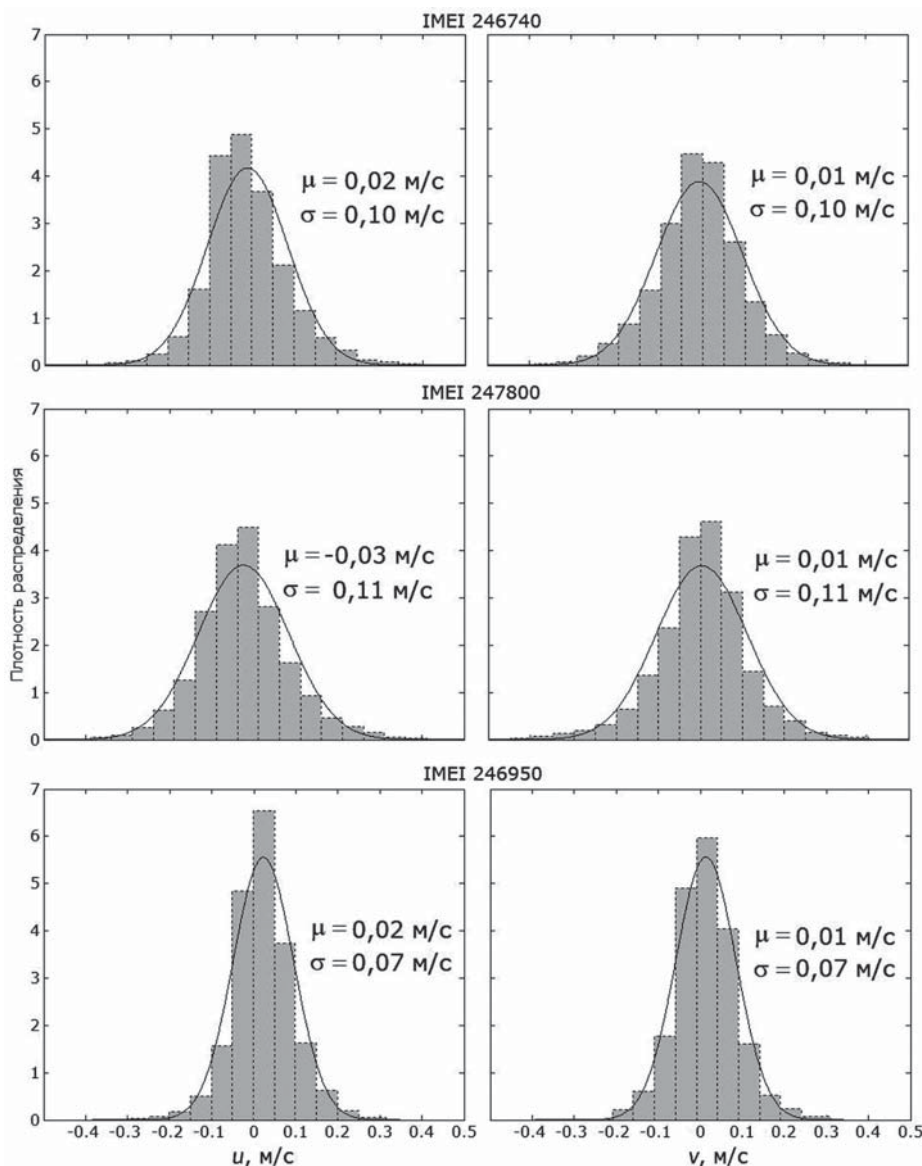


Рис. 7. Распределения зональных  $u$  и меридиональных  $v$  составляющих скоростей дрейфов, рассчитанные по траекториям дрейфтеров IMEI 246740, IMEI 247800 и IMEI 246950 (см. рис. 2в):  $\mu$  – среднее значение,  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение нормального распределения

уникальные долговременные ряды систематических оперативных данных о вертикальном распределении температуры в верхнем подледном слое океана позволяют существенно расширить и уточнить представления о процессах взаимодействия в системе «атмосфера — лед — океан».

#### Наблюдения дрейфов ледяных полей

В числе наиболее значимых результатов применения «ледовых» дрейфтеров — мониторинг движения ледяных полей. Долговременные систематические ряды траекторных измерений, выполненных с помощью встроенных в корпуса дрейфтеров приемников GPS, позволяют с высокой степенью достоверности восстановить параметры движения ледяных образований.

В конце августа — начале сентября 2013 г. в рамках программы российско-американской арктической научной экспедиции АВЛАП/NABOS-2013 на

научно-исследовательском судне «Академик Федоров» в центральной Арктике были развернуты три «ледовых» термопрофилирующих дрейфтера BTC60/GPS/ice: IMEI 246740, IMEI 247800 и IMEI 246950. Судя по данным буя IMB (Ice Mass Balance) канадской фирмы «MetOcean», установленного в непосредственной близости от дрейфтера IMEI 246950, толщина льда составляла 1,3 м [3]. Сведения об этом эксперименте приведены в табл. 2.

С точки зрения обеспечения эффективности наблюдений следует обратить внимание на данные графы табл. 2 «Продолжительность/дистанция». 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: к пользователям поступило не менее 98% результатов измерений, выполнявшихся с интервалом 1 ч. Это относится также и к результатам измерений координат дрейфтеров по данным встроенных приемников GPS, что позволило статистически значимо оценить лагранжевые характеристики дрейфов ледяных полей.

По траекториям (см. рис. 2в), построенным по координатам, интерполированным на равномерный временной интервал 1 ч, рассчитывались скорости дрейфов. Полученные таким образом оценки средних скоростей и их среднеквадратического отклонения, как видно из табл. 2, оказались сопоставимы для дрейфтеров IMEI 246740, IMEI 247800, движение которых определялось дрейфом льда в створе Трансарктического течения. Приблизительно в полтора раза медленнее двигался дрейфтер IMEI 246950, траектория которого большей частью располагалась в западном секторе Северного Ледовитого океана.

Распределения зональных и меридиональных составляющих скоростей дрейфов, графически представленные на рис. 7, близки к нормальным, соответствующие графики и параметры которых приведены на рисунке.

Частотная структура флуктуаций скорости оценивалась по спектральным плотностям мощности (СПМ). Результаты измерений с интервалом 1 ч и значительные продолжительности рядов дрейфтерных данных (см. табл. 2) позволяют статистически значимо оценить спектральные характеристики в диапазонах мезомасштабной и синоптической изменчивостей.

СПМ рассчитывались по методу усреднения модифицированных периодограмм. 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 усреднения 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`.

В области относительно высокочастотных колебаний в СПМ составляющих скорости всех дрейфтеров наблюдаются ярко выраженные максимумы на частотах  $(2,00 \pm 0,02)$  цикл/сут, т. е. вблизи инерционных частот для средних широт дрейфов. Амплитуды максимумов по данным дрейфтеров IMEI 246740 и IMEI 247800 соизмеримы и приблизительно в три раза превышают амплитуды соответствующих максимумов СПМ составляющих скорости по данным дрейфтера IMEI 246950.

В области синоптических масштабов изменчивости СПМ составляющих скоростей дрейфтеров IMEI 246740 и IMEI 247800 содержат статистически

значимые максимумы на периодах около 19 сут. Энергонесущие колебания со схожими периодами обнаруживаются и в СПМ атмосферного давления, также рассчитанных по показателям данных дрейфтеров, что позволяет предположить существование в этой области частот причинно-следственной связи между изменчивостями поля атмосферного давления и характеристиками движения ледяных полей.

## Заключение

Приведенный анализ следует рассматривать как предварительный. Тем не менее его результаты, в частности уникальные по продолжительности ряды систематических данных наблюдений, убедительно свидетельствуют о создании эффективного автономного средства долговременного оперативного мониторинга термических процессов в верхнем, в том числе подледном слое океана, динамики ледяных полей, полей атмосферного давления и могут служить основанием для создания надежной и экономичной системы наблюдений полярных регионов океана с помощью термопрофилирующих дрейфтеров ВТС60/GPS/ice.

## Литература

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. 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 / Мор. гидрофиз. журн. — 2014. — № 5. — С. 9—32.
3. Cold Regions Research and Engineering Laboratory. Ice mass balance results: 2013E // <http://imb.erd.c.dren.mil/2013E.htm>.
4. 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 // *J. of Geophys. Res. — Oceans.* — 2010. — 115.
5. 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. of Geophys. Res.* — 2011. — 116. — C11015. — doi:10.1029/2010JC006803.
6. Steele M., Rigor I. Measuring of the Upper Layer Temperature of the Arctic Ocean // Results from the Third NSF AON Principal Investigators (PI) Meeting. Boulder, 30 November — 2 December 2009. — [S. l.], 2009. — P. 102—104.
7. UpTempO. Upper level Temperature of the Arctic Ocean Project / Univ. of Washington; Applied Physics Laboratory; Polar Science Center // <http://psc.apl.washington.edu/UpTempO/>.