

## Опыт применения барометрических дрейфтеров для исследований Арктического региона Мирового океана

© 2016 С.В. Мотыжев, Е.Г. Лунев, А.П. Толстошеев

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

*E-mail: marlin@marlin-yug.com*

Поступила в редакцию 20.03.2016 г.

Рассмотрены результаты долговременных натуральных экспериментов с использованием барометрических дрейфтеров, разработанных в Морском гидрофизическом институте РАН и ориентированных на применение в полярном регионе. Дрейфтеры были произведены российской фирмой ООО «Марлин-Юг». На основании полученных данных делается вывод о целесообразности и возможности установления дрейфтерного систематического оперативного мониторинга поля давления в приповерхностном слое атмосферы над Северным Ледовитым океаном и полярными морями. Ассимиляция данных мониторинга позволит повысить адекватность результатов математического моделирования крупно- и мезомасштабной атмосферной динамики и снизить вероятность ошибочных прогнозов.

**Ключевые слова:** атмосферное давление, барометрический дрейфтер, Арктический регион.

**Введение.** Эффективность решения задачи создания регионально ориентированной информационно-вычислительной системы моделирования и прогноза морской динамики и эволюции экосистемы, способной дать надежную информацию для принятия управленческих решений, корректирования действующих и обоснования будущих хозяйственных проектов, определяется уровнем развития наблюдательных систем, математических моделей эволюции среды и методов ассимиляции результатов наблюдений. Анализ состояния оперативных наблюдательных систем как сегмента современной геоинформационной технологии позволяет сделать вывод, что в настоящее время одной из наиболее эффективных является система дрейфтерных наблюдений. Постоянно действующая в Мировом океане сеть поверхностных дрейфующих буев предоставляет систематическую оперативную информацию о циркуляции поверхностных вод, термических процессах в верхнем слое океана, атмосферном давлении. Дрейфтерные данные, полученные в последние полтора десятилетия, позволили уточнить и даже изменить существующие представления о закономерностях и механизмах формирования региональных климатических тенденций и гидрометеорологических аномалий под влиянием глобальных процессов в системе океан – атмосфера, в том числе в высоких широтах. В настоящей работе рассмотрены основные результаты анализа целесообразности и возможности установления дрейфтерного систематического оперативного мониторинга поля давления в приповерхностном слое атмо-

сферы над Северным Ледовитым океаном и морями Арктической зоны Российской Федерации.

Атмосферное давление является одним из важнейших метеорологических элементов, на основе которых осуществляется численное моделирование погоды. По своим основным характеристикам наблюдательная сеть должна соответствовать требованиям ряда международных программ Межправительственной океанографической комиссии (МОК) ЮНЕСКО и Всемирной метеорологической организации (ВМО): по численным моделям прогноза погоды – программе *Global NWP*, в том числе высокого разрешения – *HR NWP*; по наблюдениям изменчивости климата – *GCOS*; по построению морской наблюдательной системы – *GOOS*. В этих программах сформулированы три уровня требований к пространственно-временному разрешению наблюдений, времени задержки поступления данных и допустимой погрешности измерений (таблица): 1) минимально допустимые (в таблице – «мин.»); 2) оптимальные («опт.»), при достижении которых достигается существенное улучшение качества работы модели или системы; 3) целевые («цель»), или максимально жесткие, при выполнении которых дальнейшее улучшение не имеет смысла. Требования этих программ к мониторингу барических полей обобщены в [1].

### Требования ВМО и МОК к наблюдениям приводного барического поля

Программа	Масштаб наблюдений						Время задержки, ч			Погрешность, гПа		
	пространственный, км			временной, ч								
	мин.	опт.	цель	мин.	опт.	цель	мин.	опт.	цель	мин.	опт.	цель
<i>Global NWP</i>	500	100	15	12	6	1	6	0,5	0,1	1	1	0,5
<i>HR NWP</i>	20	5	1	6	1	0,5	2	0,5	0,25	1	0,65	0,5
<i>GCOS</i>	500	300	200	24	6	3	12	6	3	1	0,65	0,5
<i>GOOS</i>	100	63	50	48	30,2	24	7	4	3	15	11,4	10

Анализу состояния проблемы контроля метеопараметров в Арктическом регионе Мирового океана с необходимым пространственно-временным разрешением посвящено большое количество публикаций, смысл которых с точки зрения оценивания современного состояния наблюдательной сети коротко изложен в [2]. Систематизируя имеющиеся данные по изучению Арктики, автор статьи делает вывод о том, что, хотя исследования в Арктике с различными целями чрезвычайно актуальны, их практическая реализация остается делом технически и организационно непростым и дорогостоящим. В работе [3], посвященной непосредственно проблеме мониторинга поля атмосферного давления в полярных регионах, указывается, что из-за трудностей размещения и высокой стоимости содержания метеостанции распределены по Северному Ледовитому океану скудно (*sparse*). Это обстоятельство, очевидно, затрудняет валидацию модельных прогнозов и может приводить к ошибкам в результатах.

Начиная с 2010 г. наметилась тенденция к изменению ситуации в лучшую сторону. В определенной степени это связано с работами Морского гидрофизического института (МГИ) Российской академии наук и ООО «Марлин-Юг»

по созданию и внедрению дрейфтерной технологии в практику полярных и приполярных исследований [4]. Ниже рассматриваются результаты анализа этой деятельности применительно к решению задачи установления систематического оперативного мониторинга поля атмосферного давления в Арктике.

**Барометрический дрейфтер.** Построение экономной и технологичной полярной сети наблюдений, обеспечивающей контроль приповерхностного атмосферного давления с необходимым пространственно-временным разрешением, возможно путем комплексного решения двух задач: создания мало-стоимостного с автономностью не менее двух лет средства измерения, устойчивого к воздействию влияющих факторов, характерных для полярных условий эксплуатации; адаптации интерфейса средства измерения к существующим системам оперативной доставки данных пользователям.

Основанием для решения этих задач могут служить разработки, выполненные в МГИ в 2000 – 2015 гг. Важным является то обстоятельство, что результаты этих разработок апробированы в многолетних натуральных экспериментах в различных регионах Мирового океана. В качестве базового элемента полярной сети наблюдений представляется целесообразным использовать автономный барометрический дрейфтер типа *SVP-B* [5], адаптированный к полярным условиям эксплуатации. В состав дрейфтера входят канал измерения атмосферного давления с баропортом, обеспечивающим корректное сообщение датчика с атмосферой в условиях ветровых и волновых воздействий, и канал измерения температуры поверхности (*SST*). Координаты дрейфтера измеряются встроенным приемником глобальной системы позиционирования *GPS*. Результаты измерений передаются пользователям по каналам спутниковых систем связи *Argos* или *Iridium*.

Канал контроля поля атмосферного давления включает в себя совокупность всех технических, информационных и программных средств, которые участвуют в процессах измерения атмосферного давления, контроля качества и доставки данных пользователям. Структура построения канала показана на рис. 1. В качестве первичного преобразователя давления используется датчик типа *MS5534B* (*Intersema*, Швейцария). Как показано в [6], при индивидуальной градуировке датчиков погрешность измерения давления в диапазоне 850 – 1055 гПа при температуре среды от минус 20 до 20°C не превышает 2 гПа в течение 12 мес.

Важнейшим показателем эффективности бародрейфтера как автономного необслуживаемого средства наблюдений является надежность его метрологических и эксплуатационных характеристик. Одним из экспериментов, по результатам которого можно сделать вывод о возможности и целесообразности построения сети мониторинга атмосферного давления в Арктическом регионе на основе специализированной модификации бародрейфтера МГИ, следует считать долговременные испытания такого бародрейфтера на м. Барроу, расположенном на севере Аляски. Сопоставительные испытания проводились по инициативе сотрудников Вашингтонского университета с целью оценивания эксплуатационных характеристик бародрейфтеров различных производителей в полярных условиях. Бародрейфтер *ID128647*, разработанный в МГИ и

изготовленный ООО «Марлин-Юг», был установлен в начале июля 2013 г. на полигоне м. Барроу совместно с бародрифтерами других производителей, в числе которых фирмы *MetOcean* (Канада) и *Pacific Gyre* (США). Продолжительность автономной работы бародрифтера составила 857 сут. За это время было выполнено и передано по каналу спутниковой связи *Argos-2* более 20 000 ежечасных отсчетов атмосферного давления, температуры окружающей среды и координат по данным встроенного приемника *GPS*. 13 ноября 2015 г. бародрифтер прекратил передачу данных вследствие разряда батарей системы электропитания. По объективным причинам мы не располагаем непрерывными рядами данных, тем не менее имеющиеся у нас фрагменты позволяют сделать обоснованные выводы о качестве результатов измерений.

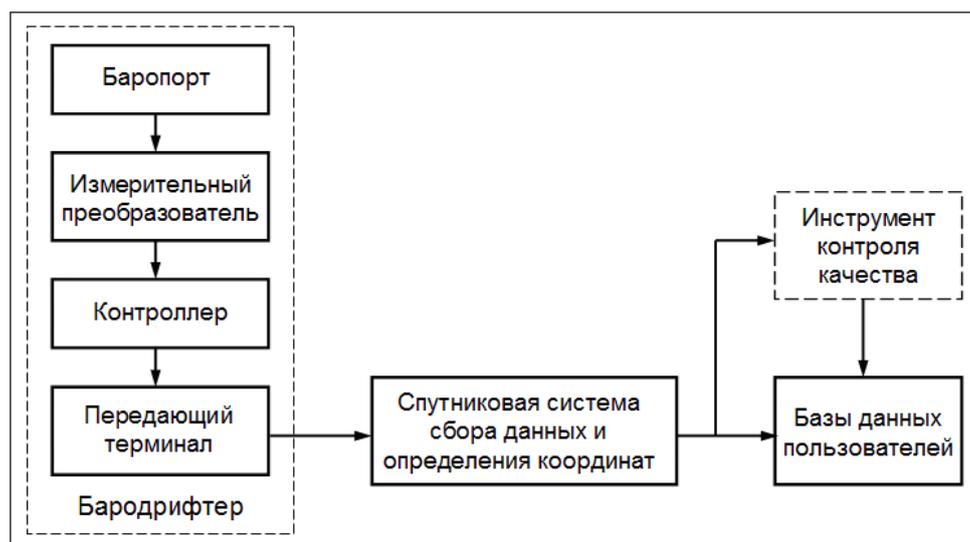


Рис. 1. Структура построения дрейферного канала мониторинга атмосферного давления

Об условиях проведения испытаний можно судить по рис. 2, о качестве результатов измерений – по графикам на рис. 3. Графики атмосферного давления построены по данным бародрифтеров *ID128647* (МГИ) и *ID2416* (производитель неизвестен), график температуры среды – по данным бародрифтера *ID128647*. Как видно из рис. 3, канал измерения атмосферного давления бародрифтера *ID128647* сохранял работоспособность в течение всего периода наблюдений, в то время как в данных бародрифтера *ID2416* наблюдались многочисленные сбои.

В плане оценивания эксплуатационных характеристик показательны также результаты сопоставления временных рядов атмосферного давления и траекторий дрейфов по данным приемников *GPS* бародрифтера МГИ *ID52494* и канадской профилирующей системы *Polar Ocean Profiling System (POPS)*, которые в апреле 2010 г. были установлены в 77 км от Северного полюса на расстоянии нескольких метров друг от друга. На рис. 4 показаны

траектории и графики временных рядов атмосферного давления, восстановленные по данным бародрифтера и системы *POPS*. В течение почти трех месяцев координаты бародрифтера без пропусков и сбоев определялись встроенным приемником *GPS* и передавались с интервалом 1 ч, что, в отличие от фрагментарных траекторных измерений системой *POPS*, позволило достоверно оценить параметры дрейфа.

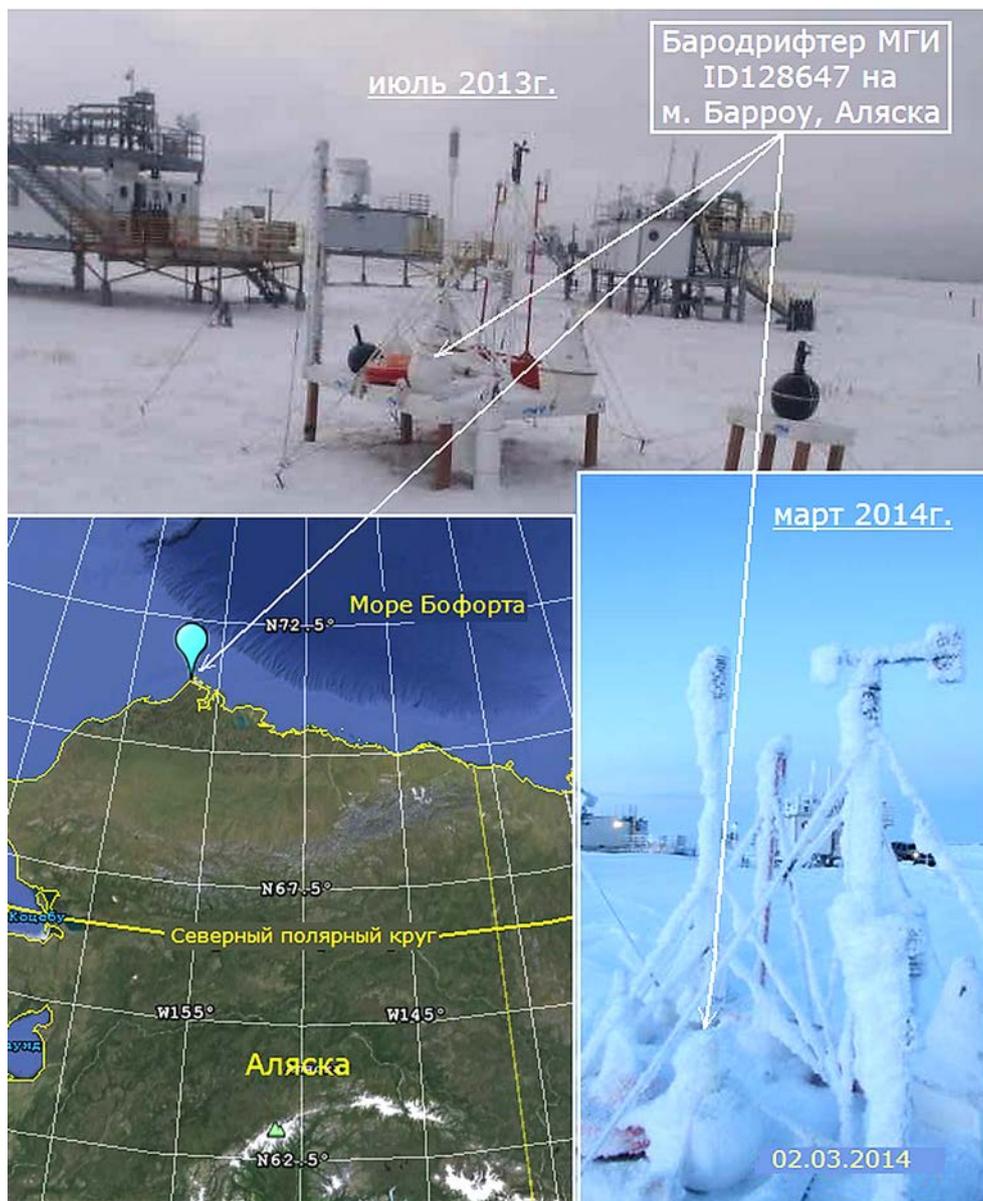
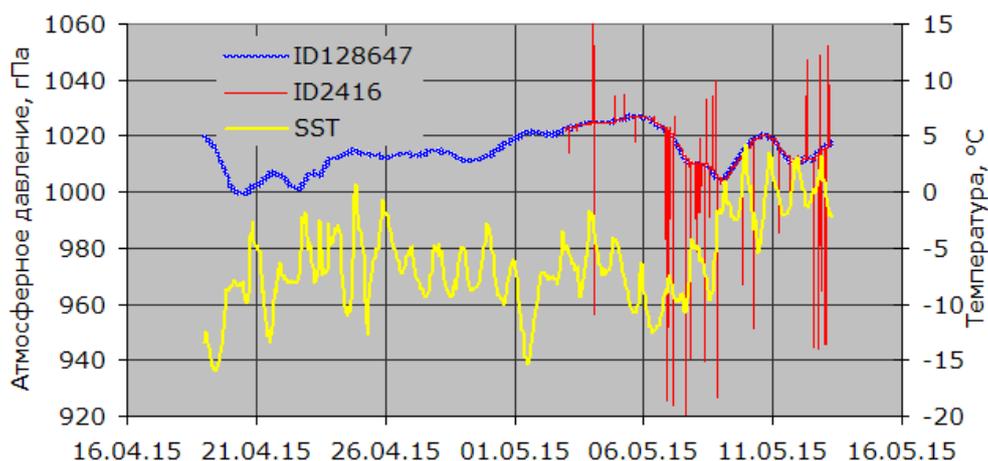
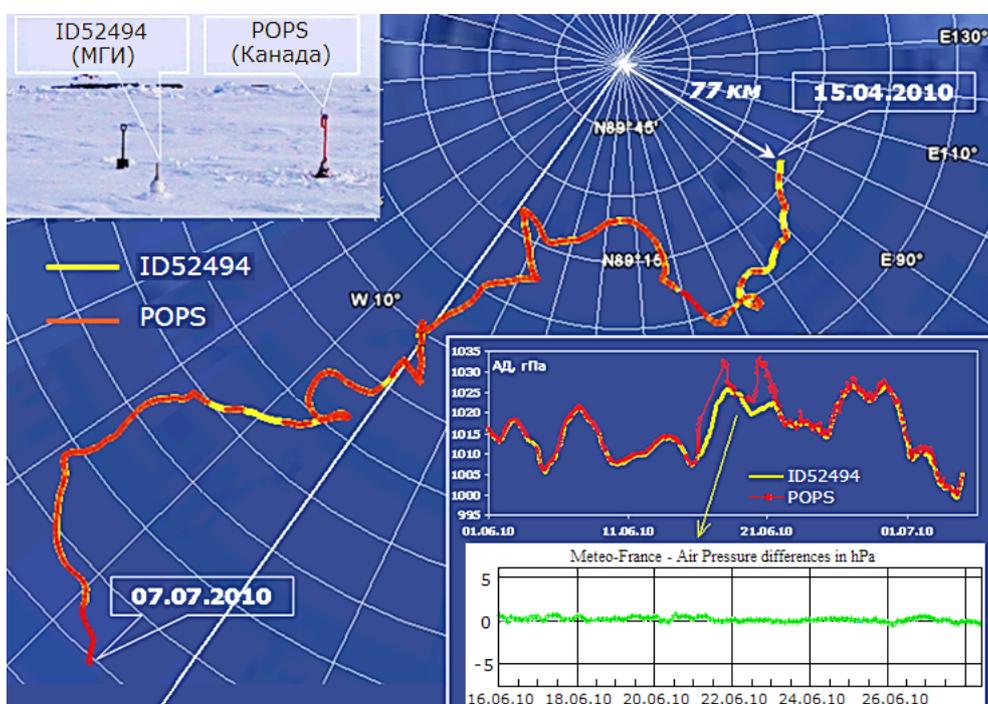


Рис. 2. Испытания бародрифтеров на севере Аляски



**Рис. 3.** Фрагменты временных рядов атмосферного давления по данным бародрифтеров *ID128647* и *ID2416* и температуры среды (*SST*) – по данным бародрифтера *ID128647* (результаты испытаний на полигоне в Аляске)



**Рис. 4.** Дрейф ледового поля и результаты наблюдений атмосферного давления по данным бародрифтера *ID52494* (МГИ) и профилирующей системы *POPS* (Канада)

Сходные выводы можно сделать и относительно результатов наблюдений атмосферного давления, временные ряды которых графически показаны на рис. 4. Судя по графикам, между данными системы *POPS* и бародрифтера МГИ существуют расхождения до 7 гПа (июнь 2010 г.). На этом же рисунке

приведен график отклонений (показан зеленым цветом) результатов измерений бародрифтером от модельных оценок атмосферного давления по данным системы контроля качества метеорологического центра *Meteo-France* (Франция). Из графика видно, что причина расхождений – сбои в измерениях системой *POPS*.

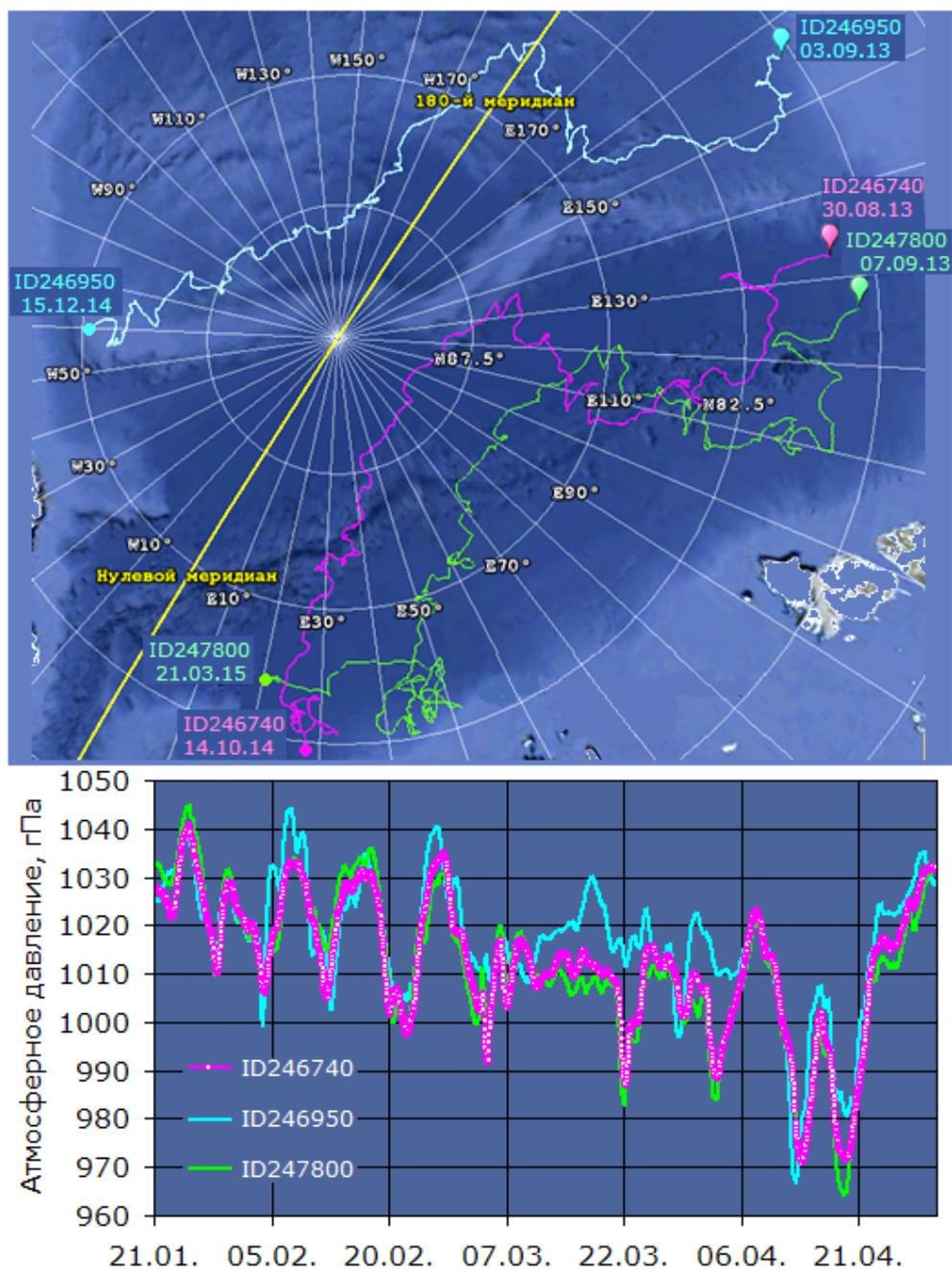
Технические и методические решения, реализованные в рассмотренных полярных дрейферных экспериментах и прошедшие долговременные испытания в арктических условиях, стали основой для создания специализированных автономных средств исследования Арктики и методов их применения. К таким средствам относятся разработанные в МГИ специализированные «ледовые» термопрофилирующие дрейферы типа *BTC60/GPS/ice*, опыт применения которых описан в [4].

**Некоторые результаты натуральных экспериментов.** В Арктике в 2012 – 2015 гг. было развернуто более 30 дрейферов типа *BTC60/GPS/ice*, общее время жизни которых по состоянию на июль 2015 г. превысило 6500 сут. По данным дрейферов было получено более 155 000 отсчетов атмосферного давления. Наиболее интенсивно дрейферные наблюдения проводились в двух регионах: море Бофорта – Канадской котловине и Центральной Арктике. Траектории некоторых дрейфов в Центральной Арктике показаны на рис. 5. За 396 сут (сентябрь 2013 г. – октябрь 2014 г.) тремя дрейферами выполнялись синхронные с интервалом 1 ч измерения атмосферного давления. На графиках рис. 5 показаны трехмесячные фрагменты данных, по которым можно судить о реальной пространственно-временной изменчивости поля атмосферного давления.

Создание сети систематических оперативных наблюдений поля атмосферного давления в Арктическом регионе как сегмента информационно-измерительной системы моделирования позволит повысить качество прогнозов, наглядной иллюстрацией чему может служить рис. 6, заимствованный из работы [3]. Из графиков, на которых представлены результаты моделирования поля атмосферного давления, видно, что ассимиляция дрейферных данных позволяет существенно уточнить модельные оценки и, как следствие, уменьшить вероятность ошибочных прогнозов.

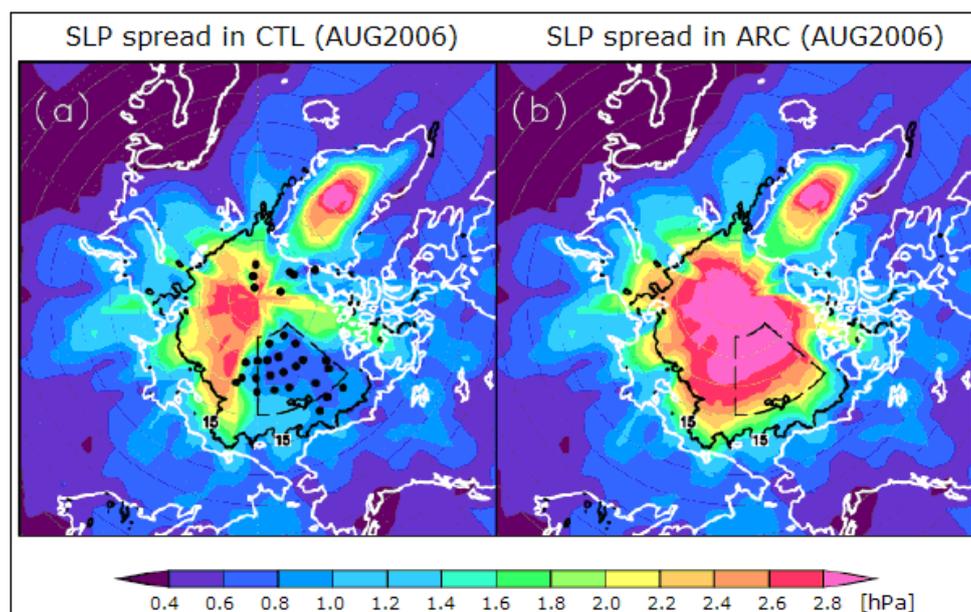
Поскольку бародрифтеры представляют собой автономные средства измерения, это исключает возможность проверки достоверности дрейферных измерений путем непосредственного контроля измерительных каналов в составе буев. Достоверность параметров, измеряемых дрейферами *in situ*, позволяет оценить система дистанционного контроля качества морских контактных наблюдений *Quality Control Tools* [7]. В этой системе, которая поддерживается метеорологическим центром *Meteo-France*, реализован метод проверки, основанный на сопоставлении результатов модельных расчетов глобального поля атмосферного давления с данными дрейферных измерений. Модели поля давления разрабатываются и поддерживаются независимыми национальными и международными гидрометеорологическими центрами. Результаты сопоставления дрейферных и модельных данных размещаются на интернет-сайте [8]. Доступ к этим данным осуществляется по уникальному для каждого дрейфера номеру ВМО, под которым дрейферная информация распространяется в глобальной системе телекоммуникационной связи *Global*

*Telecommunication System.* Информация предоставляется в графическом виде за последние 15 сут и статистическими данными о качестве работы измерительного канала дрейфтера – за последние 6 мес.



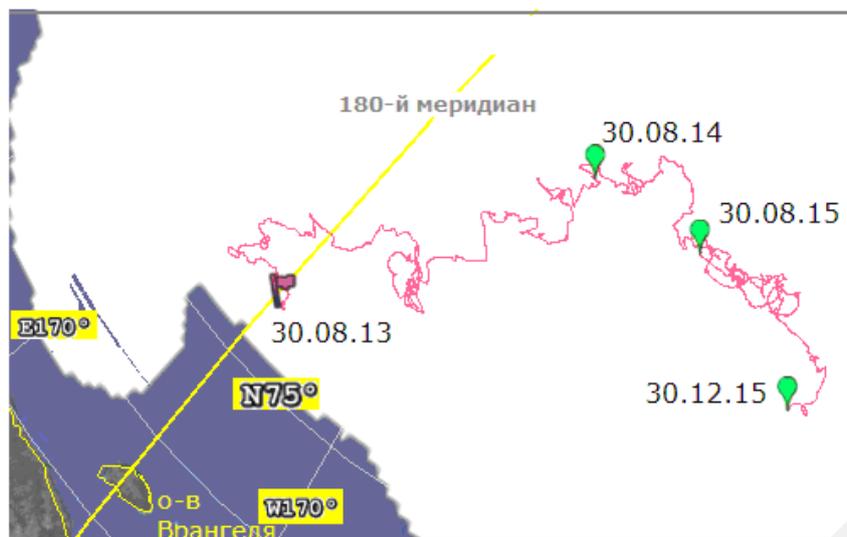
**Рис. 5.** Траектории и фрагменты временных рядов атмосферного давления по данным бародрейфтеров *BTC60/GPS/ice* ID247800, ID246740 и ID246950 в январе – апреле 2014 г.

## Sea Level Pressure (SLP) Reanalyses



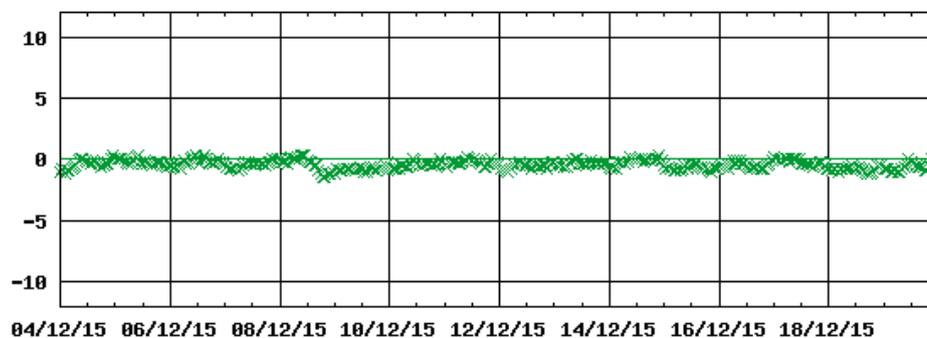
**Рис. 6.** Модельные оценки поля атмосферного давления с учетом (слева) и без учета (справа) дрейферных данных [3]. Метками черного цвета обозначены позиции бародрифтеров, данные которых ассимилировались в модели

На рис. 7 показаны результаты оценивания качества измерений атмосферного давления термопрофилирующим бародрифтером *BTC60/GPS/ice ID245950/WMO4800541*, который был развернут 30 августа 2013 г. в точке с координатами  $76,43^\circ$  с. ш.,  $178,87^\circ$  в. д. По состоянию на 23 декабря 2015 г. дрейфтер сохранял работоспособность в полном объеме, а продолжительность дрейфа (траектория на рис. 7, а) составляла 846 сут. За этот период дрейфтером с интервалом 1 ч было выполнено более 20 300 измерений атмосферного давления. На рис. 7, б приведен график отклонений измеренных в декабре 2015 г. бародрифтером значений атмосферного давления от рассчитанных по модели Глобального центра обработки спутниковых данных (Тулуза, Франция). Среднемесячные статистические показатели качества измерений, выполненных в июне – ноябре 2015 г., в сопоставлении с модельными графически показаны на рис. 7, в. Оценки средних квадратических отклонений (СКО) результатов измерений атмосферного давления не превышают, а в большинстве случаев существенно ниже среднего значения СКО, рассчитанного по данным всех бародрифтеров глобальной наблюдательной сети.

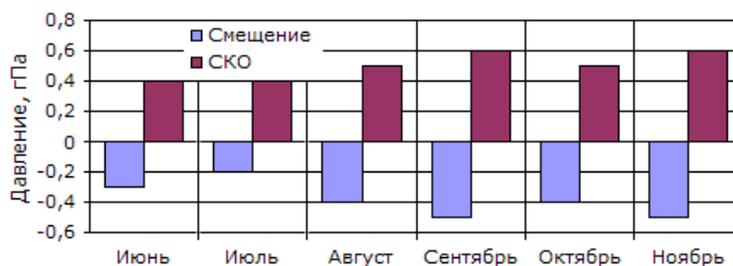


а

Meteo-France Station WMO 4800541 - Air Pressure differences in hPa



б



в

Рис. 7. Траектория дрейфа (а), графики отклонений измеренных значений атмосферного давления от рассчитанных по модели (б) и среднемесячных статистических показателей качества измерений (в) по данным бародрифтера BTC60/GPS/ice ID245950/WMO4800541

**Выводы.** Результаты экспериментов показали, что реализованные в полярных модификациях бародрифтеров аппаратно-программные решения обеспечивают надежную долговременную работу этих приборов как автономных средств оперативного систематического мониторинга поля атмо-

сферного давления в Арктическом регионе. С учетом относительно невысокой стоимости и приемлемых весогабаритных характеристик бародрифтеры могут рассматриваться в качестве элемента надежной и экономичной полярной сети оперативных метеонаблюдений.

Результаты полярных экспериментов были представлены на круглых столах, форумах и салонах, проводившихся в 2015 г. различными министерствами и ведомствами Российской Федерации, и рекомендованы к практической реализации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лунев Е.Г.* Совершенствование каналов контроля поля атмосферного давления для поверхностных дрейфующих буев // Дис. ... канд. техн. наук. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2012. – 180 с.
2. *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.
3. *Inoue J., Enomoto T., Miyoshi T. et al.* Impact of observations from Arctic drifting buoys on the reanalysis of surface fields // *Geophys. Res. Lett.* – 2009. – 36, L08501. – doi:10.1029/2009GL037380.
4. *Мотыжев С.В., Лунев Е.Г., Толстошеев А.П. и др.* Опыт применения термопрофилирующих дрейфтеров для исследований арктического региона Мирового океана // Арктика: экология и экономика. – 2016. – № 1. – С. 38 – 45.
5. *Sybrandy A.L.* Global drifter program. Barometer drifter design reference [Электронный ресурс] // DBCP Report. – August, 2009. – № 4. – Режим доступа: <http://www.jcommops.org/dbcp/community/standards.html> (дата обращения 09.02.2015 г.).
6. *Толстошеев А.П.* Исследование метрологических характеристик измерительных каналов атмосферного давления автономных дрейфующих буев // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2009. – Вып. 17. – С. 113 – 121.
7. <http://www.jcommops.org/dbcp/data/qc.html> (дата обращения 25.05.2016 г.).
8. <http://www.meteo.shom.fr/qctools> (дата обращения 25.05.2016 г.).

## Experience of barometric drifters' application for studying the World Ocean Arctic region

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

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia  
e-mail: marlin@marlin-yug.com*

The results of long-term in-situ experiments and tests of barometric drifters developed in the Marine Hydrophysical Institute, RAS and produced by the Russian company “Marlin-Yug” Ltd. for their application in the Arctic regions are considered. The obtained data testify to possibility and expediency of using the barometric drifters for operational monitoring of the air pressure fields in the surface atmosphere layer over of the Arctic Ocean and the polar seas. Assimilation of the monitoring data will increase adequacy of mathematical modeling of large- and meso-scale atmospheric dynamics and decrease probability of erroneous forecasts.

**Keywords:** air pressure, barometric drifter, Arctic area.