

РАЗРАБОТКА КАНАЛОВ КОНТРОЛЯ ПОЛЯ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ МОРСКИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДРЕЙФУЮЩИХ БУЕВ

Лунев Е.Г.

Научный руководитель: д-р техн. наук Мотыжев С.В.

Морской гидрофизический институт Национальной академии наук Украины, Украина

E-mail: elunev@ukr.net

Аннотация — Рассмотрены результаты разработки каналов контроля атмосферного давления для морских поверхностных дрейфующих буев (бародрифтеров), обеспечивающих высокую достоверность результатов контроля с высоким пространственно-временным разрешением. Обобщены технические и технологические результаты разработки, приведены результаты натурных испытаний бародрифтеров.

1. Введение

Наблюдения при помощи распределенной группировки свободно дрейфующих буев являются ключевыми компонентами систематического мониторинга морской среды и приводной атмосферы в рамках создаваемой глобальной системы оперативных наблюдений за океаном GOOS (Global Ocean Observing System). Результаты мониторинга в виде полей атмосферного давления являются весьма важными для метеорологических центров при составлении прогнозов погоды, а также при раннем обнаружении и распространении ураганов.

Актуальность представленной работы обусловлена необходимостью получения достоверной информации об атмосферном давлении в открытых районах Мирового океана с помощью автономных бародрифтеров, функционирующих в сложных метеорологических условиях реальной среды, что приводит к недостаточной эффективности и надежности существующих технических средств. В условиях интенсивных ветрового и волнового воздействий на измерительный канал возникают значительные сложности в получении достоверных данных об атмосферном давлении. Кроме того, существующие системы передачи данных с бародрифтеров не обеспечивают надежной привязки данных измерений к географическим координатам и характеризуются значительными потерями измерительной информации.

В работе обобщены технические и технологические результаты разработки дрейферных барометрических каналов и приведены результаты их реальной эксплуатации в натуральных условиях.

2. Основная часть

Известно, что атмосферное давление является одним из важнейших метеорологических элементов, на основе которых осуществляется численное моделирование погоды. Наибольшую практическую значимость имеют наблюдения в приводном слое Мирового океана, который охватывает большую часть поверхности Земли. В современной структуре глобальной наблюдательной системы контактные измерения атмосферного давления обеспечиваются следующими сегментами: попутными кораблями, якорными буями и поверхностными дрейфующими буями с барометрическими каналами — бародрифтерами, численность которых в Мировом океане поддерживается на уровне около 700 буев. Последние являются эффективным, а во многих случаях и единственным инструментом для осуществления оперативных гидрометеорологических наблюдений, особенно в тех районах океана, где отсутствуют регулярные транспортные магистрали.

Бародрифтер (рис. 1) состоит из поверхностного поплавка с аппаратурой и элементами электропитания, тросовой линии и подводного паруса. Ввод давления осуществляется через барометрический порт (баропорт), исключающий прямой контакт датчика давления с водной средой при погружениях буя. Алгоритм измерения обеспечивает фильтрацию отсчетов, полученных в подводном положении дрейфера. Наблюдения регистрируются с часовой периодичностью. Передача данных наблюдений и определение траекторий дрейферов осуществляется с помощью спутниковой системы Argos.



Рис. 1

При создании группировки бародрифтеров возник ряд технических проблем, связанных с жесткими условиями эксплуатации буев в реальных условиях. В частности, анализ результатов эксплуатации барометрических дрейферов различных производителей [1] выявил наличие большого количества проблем при измерениях атмосферного давления. Аномальные значения давлений могут быть обусловлены как влиянием внешних воздействий (поверхностного волнения, приводного ветра), так и конструктивными недостатками баропортов дрейферов, недостаточной долговременной стабильностью измерительных преобразователей, несовершенством алгоритмов фильтрации первичных результатов измерений и множеством других факторов. Отдельно можно выделить проблему значительных потерь измерительной информации при передаче на берег и сложность обеспечения надежной привязки данных измерений к географическим координатам.

Для решения указанных проблем предложен усовершенствованный дрейферный канал контроля поля атмосферного давления, включающий в себя совокупность средств, которые участвуют в процессе

измерения, контроля качества и доставки данных. На рис. 2 изображена структура такого канала.

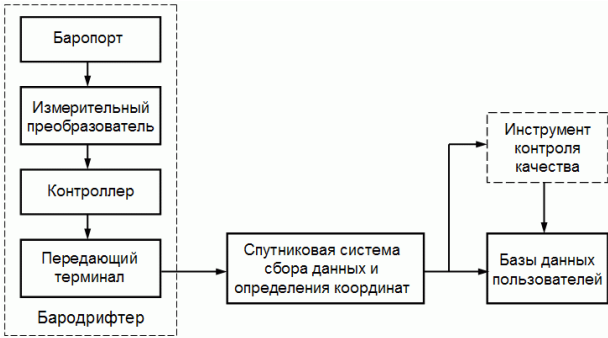


Рис. 2

Совершенствование конструкции барометрических дрейфтеров. Баропорт является устройством, которое должно устранить или минимизировать влияние внешних воздействий (ветра, волнения и др.) на процесс измерения атмосферного давления. В качестве базовой конструкции баропорта выбран колпачковый вариант (рис. 3, а), рекомендованный к применению на дрейфтерах [2]. Однако при натурных испытаниях таких баропортов, выполненных в 2005 г. в Черном море, были выявлены выбросы в показаниях атмосферного давления при уровне погружений свыше 30% (по данным встроенного в дрейфтер датчика погружений), что по приблизительным оценкам соответствовало скорости ветра около (15 ... 20) м/с. Причиной таких выбросов явилось горизонтальное расположение мембраны — фильтрующего элемента баропорта. В такой конструкции мембрана не обладает возможностью быстро очиститься от остатков воды при кратковременном всплытии на поверхность в штормовых условиях. Предложено техническое решение баропорта, в котором при сохранении его внешних размеров мембрана установлена вертикально (рис. 3, б). Такая конструкция улучшает вентиляцию канала, снижает его инерционность и уменьшает вероятность доступа воды в полость за пределами мембраны.

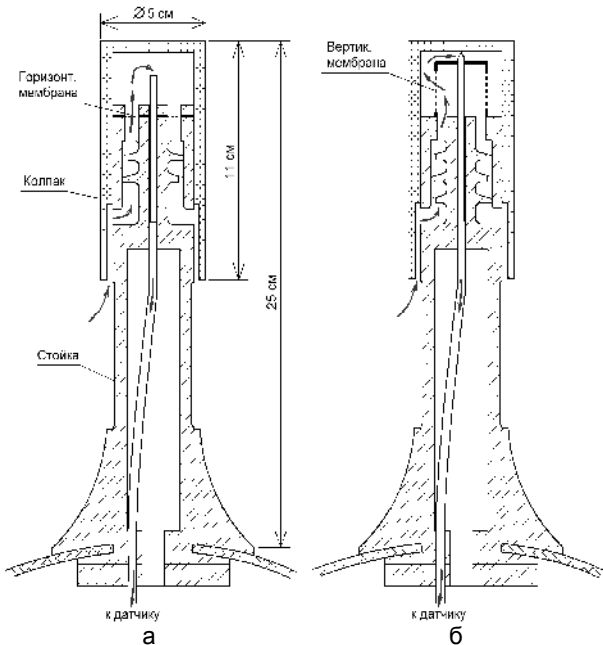


Рис. 3

Разработка измерительного преобразователя атмосферного давления бародрифттера. Исследованы метрологические и эксплуатационные характеристики первичных преобразователей давления на соответствие показателям назначения дрейфтерных каналов контроля поля атмосферного давления (таблица 1).

Таблица 1

Характеристика	Значение
Диапазон измерения, гПа	850 ... 1055
Цена единицы наименьшего разряда выходного кода, гПа	0,1
Погрешность, гПа	не более 1,0
Частота измерений, Гц	1
Рабочий диапазон температур, °С	-2 ... +35
Продолжительность безотказной работы, мес	не менее 12
Устойчивость к воздействию давлений в диапазоне, гПа	200 ... 2500
Устойчивость к воздействию температур в диапазоне, °С	-40 ... +50

В качестве первичного преобразователя был применен недорогой интегральный преобразователь давления типа MS5534B фирмы Intersema (Швейцария). На его основе предложено и реализовано техническое решение измерительного преобразователя атмосферного давления MM400 (рис. 4).



Рис. 4

Исследованы основные метрологические характеристики преобразователей MM400: функция преобразования; среднее квадратическое отклонение (СКО) случайной составляющей погрешности измерения; дополнительные составляющие погрешности, обусловленные воздействиями повышенных и пониженных температур окружающей среды; долговременная стабильность характеристики преобразования. Установлено, что для преобразователей MM400 оценка СКО систематической составляющей погрешности не превышает 0,1 гПа; погрешность от гистерезиса по температуре находится в пределах 0,3 гПа; долговременная стабильность в течение 12 мес. — не хуже 0,2 гПа [3].

Совершенствование метода помехоустойчивой фильтрации первичных данных об атмосферном давлении. Для фильтрации первичных данных измерений атмосферного давления от помех из-за погружений буя, воздействия ветра и других факторов предложен метод обработки данных, в котором перед использованием медианного фильтра используется предварительная фильтрация по критериям физической значимости результатов измерений атмосферного давления и их приращений. Информация об измерениях накапливается в структуре в виде стека, элементы которого ранжированы по возрастанию абсолютных значений давления. Каж-

дая ячейка стека сопровождается информацией о количестве одинаковых по значению элементов. При работе предварительного фильтра из стека исключаются все значения, находящиеся за пределами физически возможных значений атмосферного давления, а также исключаются единичные выбросы амплитудой менее 1 ГПа на фоне медленно меняющегося процесса. Затем данные поступают на вход медианного фильтра. Результатом такой обработки является достоверный отсчет атмосферного давления, выделенный среди множества отсчетов, обусловленных воздействием внешних факторов. Предложенный метод реализован во встроенном программном обеспечении бародрифтеров.

Развитие методов повышения пространственно-временного разрешения дрейфтерных измерений в сложных метеорологических условиях. Для повышения пространственно-временного разрешения применительно к дрейфтерным каналам решались следующие задачи: обеспечение передачи результатов измерений атмосферного давления с наименьшими потерями; обеспечение устойчивых определений местоположений дрейфтеров в условиях поверхностного волнения и сокращение временных интервалов между определениями последовательных координат.

Существенным недостатком спутниковой системы Argos является небольшая пропускная способность вследствие низкой скорости передачи данных (400 бит/с) и разреженности коротких сеансов связи, из-за чего суточный трафик не превышает 10 кБ. Для уменьшения потерь дрейфтерной информации в канале связи и повышения временного разрешения дрейфтерных измерений разработан специализированный метод передачи информации. Суть метода состоит в формировании информационных кадров с временными метками, которые помещаются в кольцевой регистр переменной длины и поочередно транслируются на спутник. Для идентификации кадров с данными и привязки их к реальному времени измерения в каждом сообщении содержатся специальные метки: ранг (N), или номер кадра, и возраст измерений (M). Применение такого метода позволило вычислять истинное время измерения ($T_{изм}$):

$$T_{изм} = T_{приема} - (N \cdot \Delta T_{изм} + M),$$

где $\Delta T_{изм}$ — интервал времени между измерениями;

$T_{приема}$ — время приема посылки спутником.

Общее количество информационных кадров, т.е. рангов, определяет длину кольцевого регистра и зависит от условий приема бортовой аппаратурой Argos сигналов передатчиков дрейфтеров. Определение оптимального значения длины кольцевого регистра выполнялось по результатам натурных испытаний передатчиков барометрических дрейфтеров в черноморских экспериментах с 2000 по 2004 гг.

Предложенный метод был апробирован в ходе реальной эксплуатации буев. Показано снижение потерь измерительной информации в канале связи на 30% по сравнению с применявшимися ранее методами, что привело к существенному повышению регулярности принятых данных. В частности, потери информации об атмосферном давлении не превышают 12% от объема выполненных измерений в реальных условиях по сравнению с 42% потерь при использовании применявшихся ранее методов [4].

Обеспечение устойчивых определений местоположений дрейфтеров в условиях поверхностного волнения и сокращение временных интервалов между последовательными опре-

делениями координат. Общим недостатком существующих дрейфтеров, оборудованных передатчиками спутниковой системы Argos, является относительно невысокая точность определения координат по доплеровскому сдвигу частоты принимаемого спутником сигнала — от 250 до 1500 м в зависимости от класса локализаций. Это приводит к значительной неопределенности пространственной привязки результатов измерений. В настоящее время все чаще применяются буи со встроенными приемниками GPS, что позволяет воспроизводить траектории буев с погрешностью не хуже 50 м. Основная сложность применения GPS в составе дрейфтеров состоит в необходимости обеспечения работы приемника в сложных ветро-волновых условиях, когда приемная антенна GPS подвержена, во-первых, частому экранированию водной средой при погружениях буя, во-вторых, испытывает значительные по амплитуде и частоте угломестные колебания вследствие качки сферического поплавка при нахождении на поверхности. Еще одна проблема, сдерживающая применение системы GPS в составе дрейфтеров, — существенное возрастание энергопотребления и, как следствие, сокращение времени работы автономных буев. Поэтому предложено усовершенствовать аппаратуру и метод функционирования приемников GPS в составе дрейфтеров.

Рядом производителей предлагаются недорогие малогабаритные приемники (модули) GPS, однако приводимые производителями характеристики не позволяют сделать вывод о возможности их применения в составе дрейфтерных измерительных каналов. Эти характеристики обеспечиваются в условиях устойчивой связи со спутниковой группировкой, что невыполнимо в условиях эксплуатации дрейфующих буев, поэтому для практической оценки таких модулей проведены лабораторные эксперименты, моделирующие работу приемника GPS в дрейфтере. В частности, подробно рассмотрены современные модули GPS типа A1080A производства фирмы Тусо и типа UP501 производства фирмы Fastrax. Эксперименты состояли в воспроизведении условий, схожих с условиями функционирования приемника GPS при погружениях дрейфтера (рис. 5).

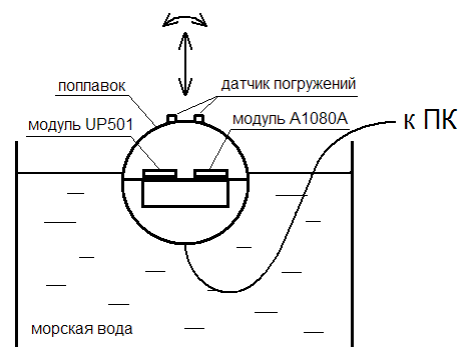


Рис. 5

Оценивались эффективность работы приемников GPS, время горячего старта и время восстановления данных. Под временем восстановления понимается время, затрачиваемое приемником на последующий захват сигналов GPS с определением координат. Установлено, что при моделировании поведения поплавка на волне со средним периодом 6 с, характерным для развигитого черноморского волнения, время первой фиксации местоположения приемником UP501 не превышало 10 с. Время восстановления после длительных погружений (до 15 с) для этого модуля не пре-

вышло 4 с. Для модуля UP501 оценка СКО точек локализации составила 29 м при максимальном отклонении 168 м; для модуля A1080A эти оценки составляли 27 м и 263 м, соответственно. Сделан вывод о возможности применения указанных приемников в составе дрейфтерных измерительных каналов при условии обеспечения компромисса между энергопотреблением и устойчивым определением координат в условиях частых погружений буя.

Для этого предложен и реализован импульсный метод устойчивого функционирования приемника GPS для дрейфующего буя, в котором учитываются помехи из-за погружений буя. В этом методе приемник GPS работает в импульсном режиме с периодом 1 ч. Скважность работы приемника зависит от времени пребывания буя в подводном состоянии и находится в пределах от 0,05 до 0,25. Минимальное значение скважности принимается основным при работе буя. При невозможности определить местоположение из-за помех от погружений буя время работы приемника GPS увеличивается до момента получения координат или до достижения максимального значения скважности. Предложенный метод был реализован в программном обеспечении барометрических дрейфтеров и позволил существенно снизить потери информации о координатах дрейфтера. По результатам реальной эксплуатации бародрифтеров с использованием этого метода количество часовых интервалов между локализациями по GPS превышает 95% от общего количества интервалов (рис. 6) при обеспечении времени автономной работы более 700 сут.

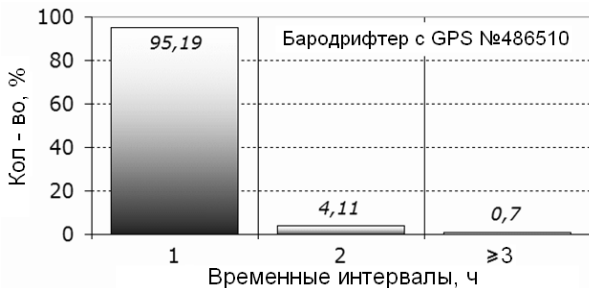


Рис. 6

Разработка технологии проверки дрейфтерных каналов контроля поля атмосферного давления. Для тестирования прохождения измерительной информации об атмосферном давлении от первичного преобразователя до сигнала с выхода антенны передающего терминала дрейфтера разработано специальное средство функциональной диагностики — проверочное устройство ATR20 (рис. 7). Прибор является портативным многоканальным приемником, способным принимать и декодировать сигналы передающих терминалов Argos, и функционально является аналогом бортового приемника спутника этой системы. В таблице 2 приведены его основные технические характеристики.

Таблица 2

Характеристика	Значение
Диапазон частот, МГц	401,629 ... 401,681
Каналы Argos	S1 ... S14, C1 ... C9, L1 ... L3
Чувствительность, мкВ	15 (при соотношении сигнал/шум 12 дБ)
Рабочий диапазон температур, °С	0 ... 60
Габаритные размеры, см	22,8 × 11,7 × 4,7
Масса, г	не более 500



Рис. 7

Анализ результатов экспериментальной апробации дрейфтерных каналов контроля поля атмосферного давления.

Широкомасштабные натурные испытания бародрифтеров проводились в тропических и южных регионах Атлантического, Индийского и Тихого океанов, а также в Черном, Каспийском и Балтийском морях. Наименьшая продолжительность работы канала атмосферного давления составила 436 сут, наибольшая — 1160 сут. Методика объективного оценивания результатов измерений атмосферного давления основана на сопоставлении модельных расчетов глобального поля атмосферного давления с данными дрейфтерных измерений. По результатам такого оценивания установлено, что разработанные каналы контроля атмосферного давления обеспечивают погрешность измерения в пределах 1,5 гПа на протяжении более 3 лет в диапазонах изменения внешних факторов, характерных для условий эксплуатации бародрифтеров, в частности, в условиях частых погружений и интенсивных ветрового и волнового воздействий. Оценки СКО результатов измерений атмосферного давления (рис. 8, на примере дрейфтеров ВМО56939 и ВМО56941) не превышают, а в большинстве случаев существенно ниже среднего значения СКО, рассчитанного по данным всех бародрифтеров глобальной наблюдательной сети (более 600 буюв). Высокие значения оценок СКО в первые месяцы работы дрейфтеров обусловлены, по-видимому, недостаточной адекватностью результатов численного моделирования барического поля в районе дрейфов буюв в этот период.

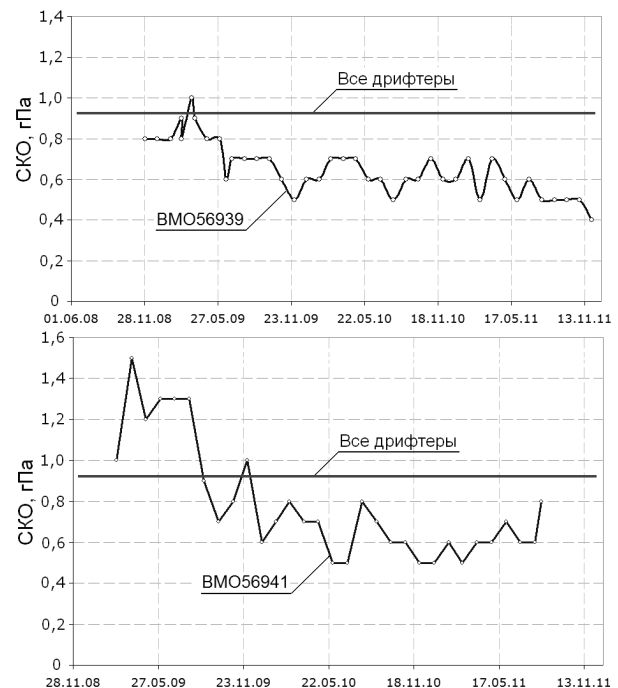


Рис. 8

С помощью бародрифтеров были зарегистрированы процессы трансформации тропических волн в тропическую депрессию и далее — в тропические шторма и ураганы, а также исследованы процессы эволюции тропических ураганов, имевших место в 2003 — 2006 гг. в Тропической Атлантике (Fabian, Isabel, Frances, Ivan, Katrina и др.) [4, 5]. На рис. 9 показан пример регистрации атмосферного давления бародрифтером ВМО41550 во время прохождения урагана Katrina в 2005 г.

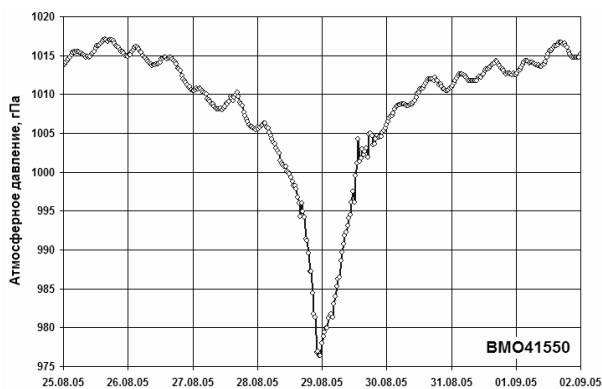


Рис. 9

На основе сети бародрифтеров создана система контроля приповерхностного барического поля в акватории Черного моря [6, 7]. Общая численность группировки в этом регионе в 2000 — 2013 гг. составляла 82 буя. Карта траекторий бародрифтеров показана на рис. 10.

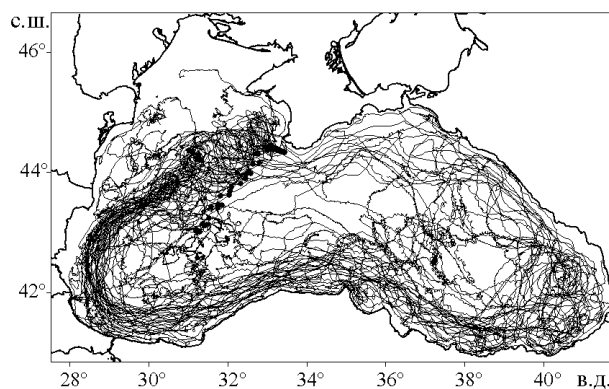


Рис. 10

Продолжительность продуктивной работы дрифтеров составила более 130000 ч; выполнено более 430000 измерений параметров среды и получены уникальные долговременные данные об изменчивости приповерхностного барического поля над открытой частью Черного моря.

3. Заключение

Таким образом, получено комплексное техническое решение дрифтерного канала контроля поля атмосферного давления, обладающего долговременной стабильностью измерений в условиях воздействия внешних факторов. Результаты представленных исследований внедрены в практику регулярных дрифтерных барометрических наблюдений в Мировом океане и используются в рамках региональных и международных научных программ и проектов. Высокие эксплуатационные и метрологические характеристики дрифтерных каналов контроля поля атмосферного давления подтверждаются результатами многолетней эксплуатации более чем

170 барометрических дрифтеров, развернутых в различных районах Мирового океана и являющихся составной частью дрифтерного сегмента глобальной системы оперативных наблюдений океана.

4. Список литературы

- [1] Blouch P. Influence of waves on the quality of air pressure measurements carried out by SVP-B drifters in North Atlantic / Surface Marine Programme. — ftp://esurfmar.meteo.fr/pub/pb/misc/dbcp/AP_waves.pdf. — 05.02.2013.
- [2] Sybrandy A. WOCE Surface Velocity Programme Barometer Drifter Construction Manual / A. Sybrandy, C. Martin, P. Niiler, E. Charpentier, D. Meldrum // WOCE Report No.134/95; SIO Report No.95/27; DBCP Technical Document No. 4. — 1995. — 63 p.
- [3] Толстошеев А.П. Исследование метрологических характеристик измерительных каналов атмосферного давления автономных дрейфующих буев / А.П. Толстошеев // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. — 2009. — Вып. 17. — С. 113 — 121.
- [4] Motyzhnev S. Estimate of hurricane prediction possibility for early stages their development by means of the specialized SVP-B drifting buoys / S. Motyzhnev, A. Tolstoshev, E. Lunev // A Year after Johannesburg. Ocean Governance and Sustainable Development: Ocean and Coasts — a Glimpse into the Future: International Conference 30th Pacem in Maribus, October 27 — 30, 2003: abstracts. — Kiev, 2003. — P. 88 — 89.
- [5] Motyzhnev S. New developments to progress Smart Buoy Idea / S. Motyzhnev, E. Horton, E. Lunev, A. Kirichenko, A. Tolstoshev, V. Yachmenev // Technological Developments and Applications of Data Buoys for Tsunami Monitoring Systems, Hurricane and Storm Surge Prediction: The DBCP Technical Workshop, October 16 — 17, 2006: proceedings. — Chennai, 2006. — P. 1 — 9.
- [6] Ратнер Ю.Б. База данных дрифтерных экспериментов в Черном море / Ю.Б. Ратнер, А.П. Толстошеев, А.Л. Холод, Е.Г. Лунев // Системы контроля окружающей среды. Средства, модели и мониторинг. — Севастополь: ЭКОСИ Гидрофизика, 2007. — С. 112 — 114.
- [7] Мотыжев С.В. Развитие дрифтерных технологий и их внедрение в практику океанографических наблюдений в Черном море и Мировом океане / С.В. Мотыжев, Е.Г. Лунев, А.П. Толстошеев // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. — 2011. — Вып. 24. — С. 259 — 272.

DEVELOPMENT OF THE METHODS AND EQUIPMENT FOR A BAROMETRIC PRESSURE MONITORING BY MEANS OF DRIFTING BUOYS

Lunev E.G.

Scientific adviser: Motyzhnev S.V.

Marine Hydrophysical Institute, Ukraine

Abstract — The article is devoted to improve the high resolution capabilities and the long duration quality of air pressure measurements within near surface atmosphere in any points of the World Ocean with rough weather conditions by means of drifting buoys, equipped with subsurface drogues. The main requirements to the drifter method of the air pressure monitoring were developed to provide for buoy the reliable and long duration autonomous measurements, when buoy gets submerged under the influence of surface waves. The buoy's equipment and methods of air pressure measurements were updated and evaluated in-situ with goal to confirm the long duration stability and accuracy of samples under influence of different environmental factors. The methods and equipment were developed and tested to increase the space-time resolution of air pressure measurements, when rough weather conditions take place for a long time. Many different long duration experiments were carried out in different areas of World Ocean, including the Black Sea. The experimental data about air pressure variability were collected, systematized and preliminary analyzed.