

СОВРЕМЕННЫЕ МОРСКИЕ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ СТАБИЛИЗИРОВАННЫЕ БУИ

Д. Г. Левченко

*Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36,
e-mail: levch35@mail.ru*

Морские стабилизированные буй в настоящее время являются относительно новой и быстро развивающейся отраслью Глобальной системы наблюдения за океаном (GOOS – Global Ocean Observing System, Strategy GOOS-2030. 2021). Они применяются в ряде актуальных исследований, направленных на решение широкого круга задач, в том числе на изучение медленно протекающих или редких природных явлений, таких как сейсмические и вулканические процессы в зонах субдукции, газообмен между океаном и атмосферой, биооптические наблюдения и др. Предлагаемая статья носит обзорный характер. Рассматриваются два различных вида стабилизированных буюв: «лонжерон» со стабилизацией движения по отношению к среднему уровню водной поверхности и «обращенный маятник» с фиксацией по отношению к морскому дну. Приводятся примеры стабилизированного бую типа «лонжерон», используемого для исследования взаимодействия атмосферы и океана, двух буюв конструкции «обращенный маятник» в составе системы для калибровки оптических спутниковых датчиков и для мониторинга смещения морского дна в зоне вулканической активности. Описывается проект стабилизированного бую конструкции «лонжерон» из напряженного железобетона, разрабатываемого в ИО РАН. Основные преимущества такого бую по сравнению с металлическими: долговечность, экологичность, относительная дешевизна. Рассматриваются особенности расчета бую железобетонной конструкции.

Ключевые слова: буй-лонжерон, буй-обращенный маятник, гидродинамические исследования, калибровка системы оптического зондирования океана, система мониторинга движения дна, проект бую из напряженного железобетона

Введение

Морские исследовательские буй в настоящее время чрезвычайно широко применяются для изучения различных характеристик водной среды и прилегающего слоя атмосферы. Большинство буюв постоянно или значительное время находится на морской поверхности и подвергается интенсивному воздействию ветра, волн и течений, что создает сложные условия для работы измерительной аппаратуры и приводит к частым их потерям (Берто, 1979; Грязин и др., 2017; Краснодарец, 2016; Livingston et al., 1977; Meindi, 1996). В связи с этим разработан особый класс морских стабилизированных буюв, конструкция которых позволяет существенно уменьшить влияние внешних факторов на результаты измерений и добиться значительного увеличения

срока их службы. С помощью таких буюв можно получать длинные временные ряды измерений для ряда связанных процессов в морской среде. Это особенно ценно при изучении нестационарных, медленно развивающихся или редких природных явлений, таких как сейсмические и вулканические процессы, вариации морских течений, состояние экологии в прибрежных районах и др. Стабилизированные буюы необходимы для выполнения научно-исследовательских работ, для которых важно использование бесшумных и малоподвижных платформ. Такие буюы вносят малые искажения в физические поля, могут долго находиться в фиксированной точке океана и обладают хорошей пространственной стабилизацией. В этом они имеют ряд преимуществ перед экспедиционными судами. Стабилизированные буюы в настоящее время являются важной и быстро развивающейся частью Глобальной системы наблюдения за океаном (GOOS) (Strategy GOOS-2030. 2021). Предлагаемая статья носит обзорный характер. Кратко приводится история появления стабилизированных буюв, рассматриваются основные принципы стабилизации буюв современной конструкции и некоторые области их применения. Также описывается проект буюа перспективной конструкции из напряженного железобетона и дается расчет его плавучести.

Первые стабилизированные исследовательские буюы начали появляться в середине прошлого столетия в основном для исследования акустических полей в открытом океане. Некоторые из них были обитаемы и содержали жилые и лабораторные помещения. Французской службой подводных исследований OERS был разработан обитаемый бую-лаборатория BORNA-1. Бую выполнен в виде 60-метровой трубы переменного сечения, с общей массой около 250 т. На расстоянии 15 м от поверхности моря в верхней части буюа размещались лаборатория, каюта для экипажа, вспомогательные помещения, радиотелефонная аппаратура и дизель-генераторы, на плоской крыше находилась вертолетная площадка. На специальной мачте были установлены приборы для атмосферных наблюдений, в подводной части буюа – гидроакустическая аппаратура. В ходе эксплуатации было установлено, что колебания буюа даже при сильных штормах не превышают 3° , а собственный период качки был равен 22 с (Лобковский и др., 2005; Шехватов, 2011).

В институте Скрипса (США) в 1962 г. был разработан и до настоящего времени находится в эксплуатации обитаемый бую-лаборатория FLIP (Floating Instrument Platform). Несколько раз за это время бую подвергался модернизации на берегу. Верхняя часть буюа выполнена как у судна для удобства буксировки в горизонтальном положении. С помощью заполнения балластных цистерн водой бую переводится в вертикальное положение. Длина буюа FLIP – 108 м, водоизмещение в вертикальном положении – 2000 т. На буюе установлены 3 дизель-генератора. На надводной платформе имеются выдвижные стрелы, лебедки и другое оборудование. Бую снабжен системой ориентации, радиолокатором, радионавигационной и специальной аппаратурой, предназначенной для измерения акустических сигналов, сейсмических и внутренних волн, течений и других параметров водной среды и приводного слоя атмосферы. При воздействии волн высотой 1.5 м с периодом 11 с колебания буюа не превышают 0.2° , при амплитуде вертикальных перемещений 4 см (Шехватов, 2011; Fisher, Spiess, 1963).

В СССР в Акустическом институте и в Институте океанологии им. П. П. Ширшова Академии наук также разрабатывались и использовались подобные стабилизированные буй. Буй ИО АН был установлен в северо-восточной части Черного моря в районе г. Геленджик в 4 милях от берега на участке с глубиной 90 м. Буй с 1971 г. по 1982 г. находился в эксплуатации, из которой был выведен по условиям своего технического состояния. По конструкции буй представлял собой стальной цилиндр диаметром 1.22 м и длиной 48 м, при общем весе около 50 т. Он состоял из трех отсеков, разделенных стальными перегородками. Нижний отсек предназначался для жидкого балласта, во втором отсеке находился сжатый воздух, в головной части буя размещались регистрирующая аппаратура и источники электропитания. На верхней части буя было установлено рабочее помещение, предназначенное для обслуживающего персонала и исследовательской аппаратуры. Буй мог работать в условиях дрейфа и в условиях постановки на одноточечную якорно-швартовую систему. При дрейфе буй был связан кабельной линией с сопровождающим судном. Путем заполнения и осушения балластного отсека буй переводился из горизонтального положения в вертикальное (Вайсбанд и др., 1974; Вайсбанд, 1980).

В 1972 г. буй ИО АН был модернизирован для использования его в качестве пункта стационарных океанологических измерений. Для этого была разработана двухъякорная система с притопленными бочками, позволившая исключить вращение буя вокруг оси. Рабочее помещение, предназначенное для размещения обслуживающего состава и измерительной аппаратуры, представляло собой прямоугольную металлическую рубку и имело две рабочих палубы – верхнюю и нижнюю. Буй был оборудован кран-балками, метеорологической и гидрологической измерительной аппаратурой. Испытания буя показали, что при максимальном волнении высотой 5 м и длине волн около 100 м вертикальные колебания буя составляли до 0.2 м, а наклонные – менее 3° (Вайсбанд и др., 1974; Вайсбанд, 1980; Лобковский и др., 2005).

Основные принципы стабилизации описанных буюв, получивших название «лонжерон» (*spag* – англ.), состоят в смещении центра тяжести глубоко под поверхность воды, где волнение практически отсутствует, и в увеличении массы для смещения собственных частот колебаний ниже частоты ветрового волнения. Поэтому буй имеет форму длинных цилиндров-лонжеронов. Для исключения вращения вокруг оси используется система из двух или большего числа якорей, а для смягчения рывков волн применяются промежуточные притопленные плавучести. Примеры современных буюв такой конструкции рассмотрены ниже.

В начале 2000-х годов в ряде важных областей океанических исследований и морских технологий появилась необходимость измерения медленных движений океанического дна. В том числе движения тектонических плит в зонах субдукции, деформации поверхности вблизи подводных вулканов, проседания дна в районах интенсивных нефтегазовых разработок и др. (Bevilacqua et al., 2015; Chadwick et al., 2012). Для этих целей был предложен и опробован ряд методов. Одним из них является метод с использованием стабилизированных буюв специальной конструкции, с фиксацией положения буя относительно морского дна. Такая конструкция

буя получила название «обращенный маятник» (inverted pendulum – англ.). Эта же система оказалась применимой для других целей, в частности, для калибровки космических датчиков цветовой яркости океана (Bailey, De Martino, 2014; Zibordi, Coauthors, 2006).

Способы стабилизации морских исследовательских буйев

В настоящее время стабилизированные буи находят применение в различных областях морских исследований и при этом используются соответствующие специфические способы стабилизации. Вначале разрабатывались стабилизированные буи, с помощью которых, прежде всего, стремились уменьшить воздействие ветра, ветровых волн и течений на результаты измерений. В таких буйах стабилизация осуществляется по отношению к среднему уровню водной поверхности за счет увеличения массы буйа, уменьшения площади поперечного сечения и смещения центра тяжести глубоко под воду в область малого волнения. Для этого используется конструкция длинного вертикального корпуса-лонжерона (рисунок 1а). Возмущающие силы в виде ветра и ветрового волнения действуют только на верхнюю часть буйа, вызывая вертикальные и наклонные его перемещения. Центр плавучести B такого буйа находится значительно выше центра тяжести G и создает возвращающий момент с рычагом A . Для исключения вращения буйа вокруг вертикальной оси, противодействия течениям и предохранения от «рывков» применяется специальная система швартовки с использованием нескольких якорей и промежуточных притопленных плавучестей (Вайсбанд, 1980; Лобковский и др., 2005).

Следует отметить, что существенное снижение влияния волнения на буй-лонжерон происходит только в области частот выше резонансных. На резонансных и более низких частотах буй ведет себя как обыкновенный поплавочек. Однако такие сверхнизкочастотные процессы, вызванные приливами, ветровыми нагонами, перепадами атмосферного давления и другими причинами с временным масштабом в несколько часов имеют слишком малую крутизну склонов для возбуждения наклонных колебаний буйа. Вертикальный подъем буйа в этих случаях происходит настолько медленно, что не влияет на работу большинства измерительных приборов и довольно точно отслеживается с помощью GPS сети (Halkyard, Horton, 1996; Newman, 1963).

Резонансную частоту вертикальных колебаний буйа-лонжерона можно оценить по формуле (Newman, 1963):

$$2\pi F_r = \left[\rho g S_0 (M + M_w)^{-1} \right]^{1/2} \quad F_r \approx 28R_0 (M + M_w)^{-1/2}.$$

Здесь F_r – частота резонанса (Гц), ρ – плотность воды ($\text{кг}/\text{м}^3$), g – ускорение силы тяжести ($\text{м}/\text{с}^2$), S_0 – площадь поперечного сечения буйа в районе ватерлинии (м^2), M – масса буйа (кг), M_w – присоединенная масса воды (кг), R_0 – радиус буйа в районе ватерлинии (м).

Из формул видна квадратичная зависимость резонансной частоты вертикальных колебаний бую от его массы. Аналогичная зависимость существует для частоты наклонных колебаний бую от его длины и массы. Отсюда следует необходимость значительного увеличения размеров бую для снижения его собственных частот колебаний.

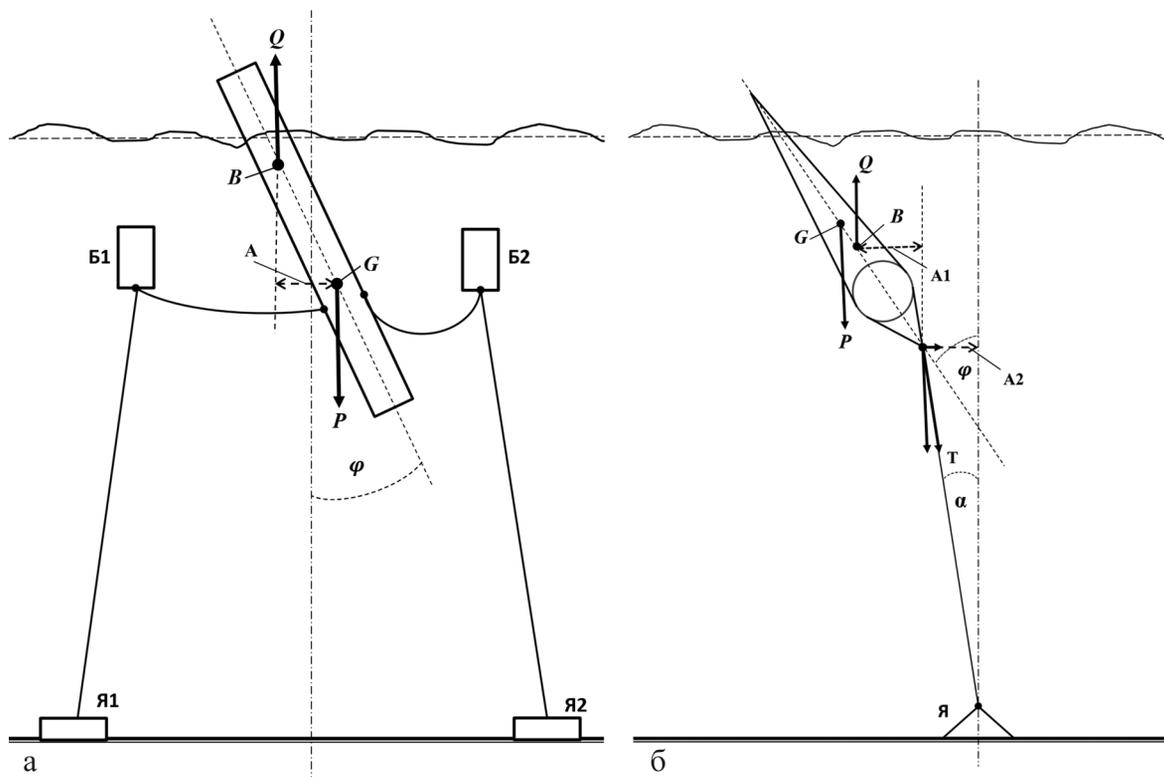


Рис. 1 – Эскизы конструкции буюв: **а)** конструкция «лонжерон» **б)** конструкция «обращенный маятник»: B – центр плавучести; G – центр тяжести; Q – вектор плавучести; P – вектор тяжести; φ – угол наклона бую; T – вектор натяжения буй-репа; α – угол наклона буй-репа; $A, A1, A2$ – возвращающие рычаги; $Я, Я1, Я2$ – якоря; $Б1, Б2$ – плавучести

Для заметного уменьшения влияния ветрового волнения в открытом океане резонансы при наклонных и вертикальных колебаниях такого бую необходимо смещать в область частот ниже 0.05 Гц. При этом масса лонжерона достигает 100 т и более при длине больше 50 м, что может создавать трудности при транспортировке и постановке бую. Для снижения резонансной частоты иногда устанавливают в нижней части бую поперечную демпфирующую пластину большего размера, чем его сечение. Это приводит к увеличению присоединенной массы жидкости и одновременно к росту турбулентного трения. Однако при этом может увеличиться амплитуда низкочастотных колебаний (Ландау, Лифшиц, 1988; Лобковский и др., 2005; Cavaleri et al., 1981). Для увеличения затухания колебаний с помощью вихреобразования демпфирующую пластину иногда делают перфорированной (Graber et al., 2000).

Стабилизированные буй-лонжероны благодаря своей устойчивости, длительному сроку службы, хорошей энерговооруженности и стабильности системы связи могут применяться как носители аппаратуры, расположенной на различной глубине океана, на его поверхности, дне и в прилегающем слое атмосферы.

Другой стабилизированный буй, получивший распространение в последнее время, имеет конструкцию, названную «обращенный маятник». Особенностью буя является стабилизация его движения по отношению ко дну и то, что сила плавучести здесь заменяет гравитацию. Схематично конструкция буя показана на рисунке 1б. Большая сфера, создающая основную плавучесть системы, находится на значительной глубине, где эффект морских поверхностных волн практически отсутствует. Сфера соединяется с нерастяжимым буйрепом, имеющим нейтральную плавучесть и закрепленным на морском дне. Жесткая трубчатая надстройка, на которой размещается аппаратура, находится сверху сферы и выходит на поверхность. Идея конструкции состоит в том, что преобладающая вертикальная тяга обеспечивает стабильность системы при очень ограниченном влиянии надстройки, которая оказывает минимальное сопротивление ветру, волнам и течению. Динамические изменения напряжения на буйрепе при этом составляют менее процента (Hellan et al., 2002).

Буй-обращенный маятник вследствие жесткости вертикальной конструкции испытывает только наклонные колебания. Смещение от ветра и волн сводится к минимуму за счет сокращения поперечного сечения буя, большого возвращающего момента и оптимизации распределения веса и плавучести. Оптимизация проводится с учетом местных гидрологических условий и состоит в выборе размеров и материала мачты, размеров и глубины погружения плавучести и др. Необходимо учитывать наличие глубоких течений, непосредственно воздействующих на плавучесть.

Следует отметить, что поперечные движения буя происходят очень медленно, так как сильно тормозятся за счет турбулентного и вязкостного демпфирования трубчатой конструкцией. Для определения величины и направления наклонов буя используется гироскопический компас, а для учета горизонтальных смещений – система GPS (Trombetti et al., 2023).

К недостаткам буя данной конструкции относится определенная сложность постановки из-за необходимости строгого соблюдения глубины места и общей длины конструкции по вертикали. Другим возможным недостатком является существенное изменение высоты ватерлинии буя при соответствующем изменении уровня поверхности.

Буи вида «обращенный маятник» стабилизируются по отношению ко дну и используются для исследования медленных движений дна, для калибровки оптической спутниковой аппаратуры и в других случаях, когда требуется строгая фиксация измерительных приборов в пространстве (Chadwick et al., 2012; Trombetti et al., 2023; Zibordi, Coauthors, 2006).

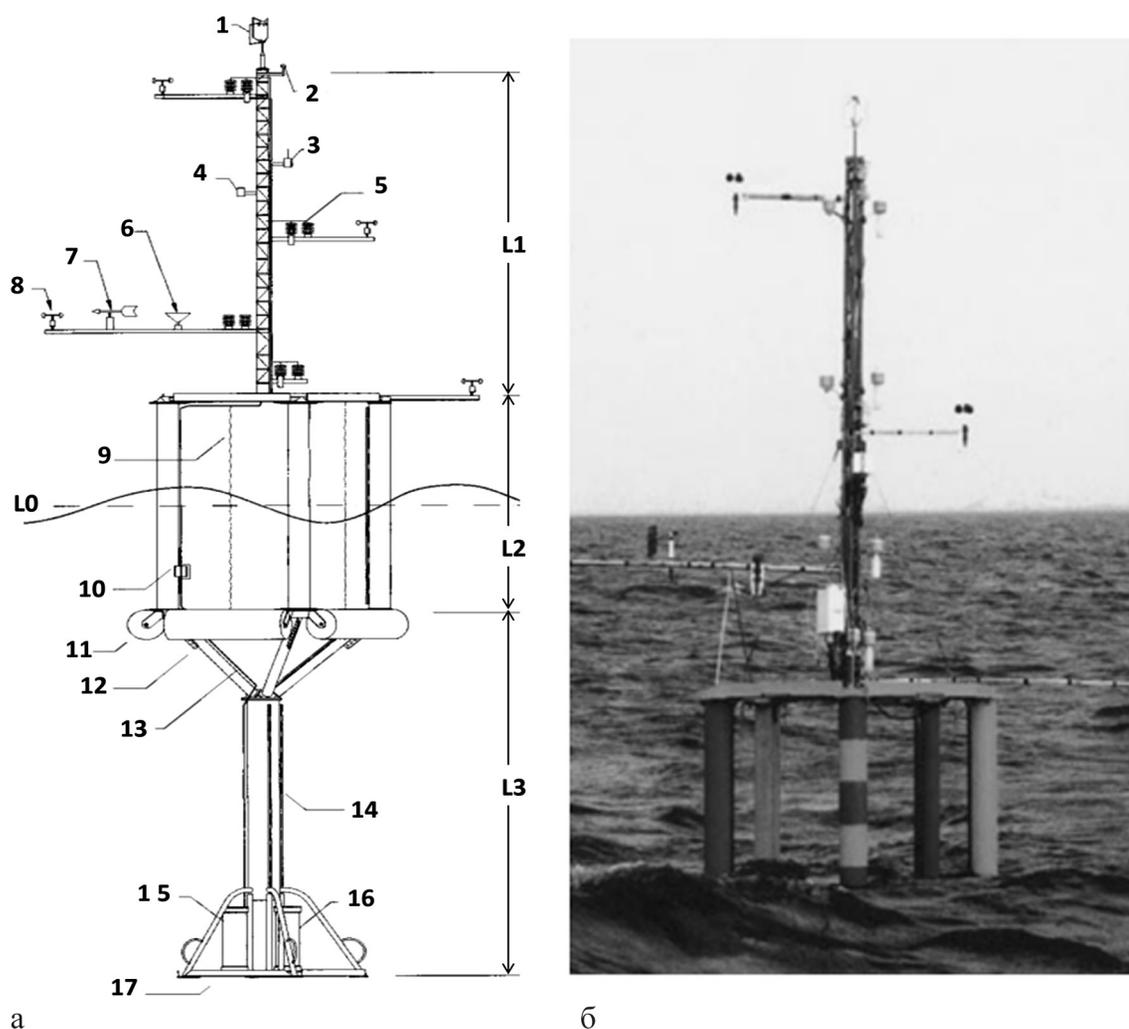
Стабилизированный буй для исследования взаимодействия атмосферы и океана

В конце 1990-х годов в Океанографическом институте Вудс-Холл и Университете штата Майами (США) был разработан новый стабилизированный буй-лонжерон ASIS (Air–Sea Interaction Spar) для измерения широкого спектра метеорологических и океанографических параметров на границе воздух–море. Буй ASIS представляет собой устойчивую платформу, что позволяет измерять широкий спектр морских волн, а его конструкция обеспечивает малые возмущения среды как в атмосфере, так и в океане. Размеры буя при этом удалось сделать сравнительно небольшими для удобства транспортировки и постановки (Graber et al., 2000; Mollo-Christensen, Dorman, 1971).

На рисунке 2а изображена схема конструкции стабилизированного буя ASIS. Буй состоит из трех основных частей. В верхней части находится мачта, на которой расположены метеорологические приборы на нескольких уровнях, измеритель солнечной радиации и аппаратура связи. Средняя часть буя выполнена «полупрозрачной» для волн и состоит из пяти вертикальных стоек небольшого диаметра. В этой части расположены струнные волномеры и термометр. В нижней части содержатся плавучести, лонжерон и основание. На основании размещается прочный контейнер с датчиками движения, гироскопическими указателями направления, регистратором и источниками питания. Основание служит одновременно противовесом и демпфером. Общая длина буя – 11 м, длина подводной части – 7 м, диаметр средней части около 2 м (Graber et al., 2000).

Сравним принципы и результаты измерения морского волнения с помощью обычного волномерного буя и стабилизированного буя типа ASIS. Движение волномерного буя (например, российского буя типа «Шторм») повторяет профиль волны. Измерение высоты волн производится с помощью двойного интегрирования сигнала вертикального акселерометра, а направление их распространения определяется по алгоритму, включающему измерения углов волнового склона относительно магнитного меридиана, задаваемого с помощью гироскопического компаса (Грязин и др., 2017; Meindi, 1996). Диапазон измеряемых длин волн ограничен снизу размерами таких буев и составляет при допустимой погрешности около 10 м. Для буя «Шторм» при диаметре 0.77 м, массе 90 кг, для длины волны до 300 м при высоте до 15 м погрешность составляет 5 %, а для длины волны 30 м при высоте 1.5 м погрешность равна 8 % (Грязин и др., 2017).

В стабилизированном бую за счет измерения высоты волны по отношению к неподвижной базе диапазон расширен в сторону гравитационно-капиллярных и коротких гравитационных волн, играющих важную роль для исследования особенностей газообмена между водной и воздушной средами, изучения процессов раннего волнообразования, для интерпретации обратного рассеяния радиолокаторов и др. (Graber et al., 2000).



а

б

Рис. 2 – Буй-лонжерон: а) схема буя-лонжерона ASIS:

1 – акустический анемометр; 2 – измеритель радиации; 3 – радиопередатчик АРГО; 4 – барометр; 5 – сухой и влажный термометры; 6 – измеритель осадков; 7 – флюгер; 8 – анемометр чашечный; 9 – струнный волномер; 10 – термометр; 11 – плавучести; 12 – точка привязки буйрепа; 13 – кабель; 14 – лонжерон; 15 – датчики движения и регистратор; 16 – батареи питания; 17 – основание; L0 – средний уровень водной поверхности; L1 – мачта 4 м; L2 – надстройка, 2,5 м; L3 – лонжерон и плавучести, 4,5 м
б) внешний вид буя-лонжерон после установки в море

Буй ASIS может работать как в дрейфе, так и в швартовом варианте. Приняты меры для уменьшения влияния швартовой системы на движения буя. Для этого специальный плавающий швартовый трос крепится одним концом к центру тяжести буя 12, а другим – к вспомогательному заякоренному бую.

Резонансный период вертикальных колебаний буя ASIS около 19 с, а амплитуда колебаний зависит от уровня демпфирования. При морских волнах с периодом менее 10 с вертикальные перемещения буя незначительны. Ожидаемый средний наклон составляет примерно 12° при скорости ветра 20 м/с.

На частотах ниже резонансной буй ASIS следует за профилем волны как обычный нестабилизированный волномерный буй. Поэтому все измерения производятся относительно движущейся системы отсчета и должны быть преобразованы в фиксированные координаты. Это осуществляется с помощью специальной вычислительной системы, содержащей инерционные датчики с шестью степенями свободы.

Система заякоренных буйев ASIS прошла морские испытания в Мексиканском заливе и в западной части Средиземного моря. Полученные результаты измерений солнечной радиации, параметров ветра, температуры, профиля и направления волн имеют высокое качество и демонстрируют работоспособность буй-лонжерона (Grabert et al., 2000).

Несмотря на успешную в целом разработку буйа ASIS, необходимо отметить ряд его недостатков. Одним из них является слабая, по нашему мнению, система швартовки, которая не исключает значительных перемещений буйа по горизонтали и его вращения вокруг оси. Вспомогательный промежуточный поверхностный буй не исправляет ситуацию. Во время сильного штормового ветра, под действием ветрового течения вся швартовочная цепочка натянется и перестанет смягчать удары волн. Более удачной представляется конструкция швартовки, состоящая из нескольких якорей и притопленных промежуточных буйев.

Другим недостатком буйа является отсутствие возобновляемого источника энергии. Питание измерительной аппаратуры и средств связи буйа ASIS осуществляется от внутреннего источника питания, смена которого в открытом океане затруднительна. Следует признать, что размещение солнечных батарей, ветрового или волнового источников на самом буйе или вблизи него недопустимо из-за искажения ими соответствующих физических полей. Поэтому энергообеспечение буйа ASIS должно осуществляться от отдельного энергобуйа.

Стабилизированный буй в системе калибровки космической аппаратуры для оптического зондирования океана

Оптическое дистанционное зондирование океана получило значительное развитие в последние десятилетия в связи с запуском для этих целей нескольких специальных спутников. Данные, предоставляемые этими спутниками, необходимы для научных исследований и различных оперативных приложений, таких как глобальные исследования углеродного цикла (McClain et al., 1996), изучение течений, мониторинг загрязнения в прибрежной зоне, регулирование рыболовства и др. Однако, прежде чем эти данные смогут использоваться, они должны быть откалиброваны по интенсивности и цвету, и этот процесс должен осуществляться непрерывно, так как условия отражения оптического излучения от водной поверхности и прохождения через атмосферу быстро меняются. На отражающие свойства океана влияет ряд обстоятельств: волнение, начиная с капиллярного, морские брызги, пена, прилегающий слой водной толщи до нескольких метров глубины и др. Калибровка осуществляется

путем измерения интенсивности излучения в непосредственной близости от поверхности океана на строго фиксированных уровнях как над, так и под водной поверхностью. При этом приборы должны иметь постоянный угол наклона к горизонту, а корпус платформы-носителя не должен мешать прохождению потока света от поверхности (Gordon, 1997; Pinkerton, Aiken, 1999; Sathyendranath, 2000). Для этих целей хорошо подходят стабилизированные буи специальной конструкции типа «обращенный маятник».

Такой буй, конструкция которого оптимизирована для измерения оптических величин в море, был разработан по проекту «Буссоль» (BOUSSOLE) в начале 2000-х годов совместно Океанографической лабораторией Национального научно-исследовательского центра Франции и Центром искусственного интеллекта София Антиполис Франции при участии французского института по исследованию моря IFREMER и норвежской компании MARINTEK (Antoine et al., 2008; Bailey et al., 2006; Clark et al., 1997). Эскиз конструкции буя представлен на рисунках 3а, б.

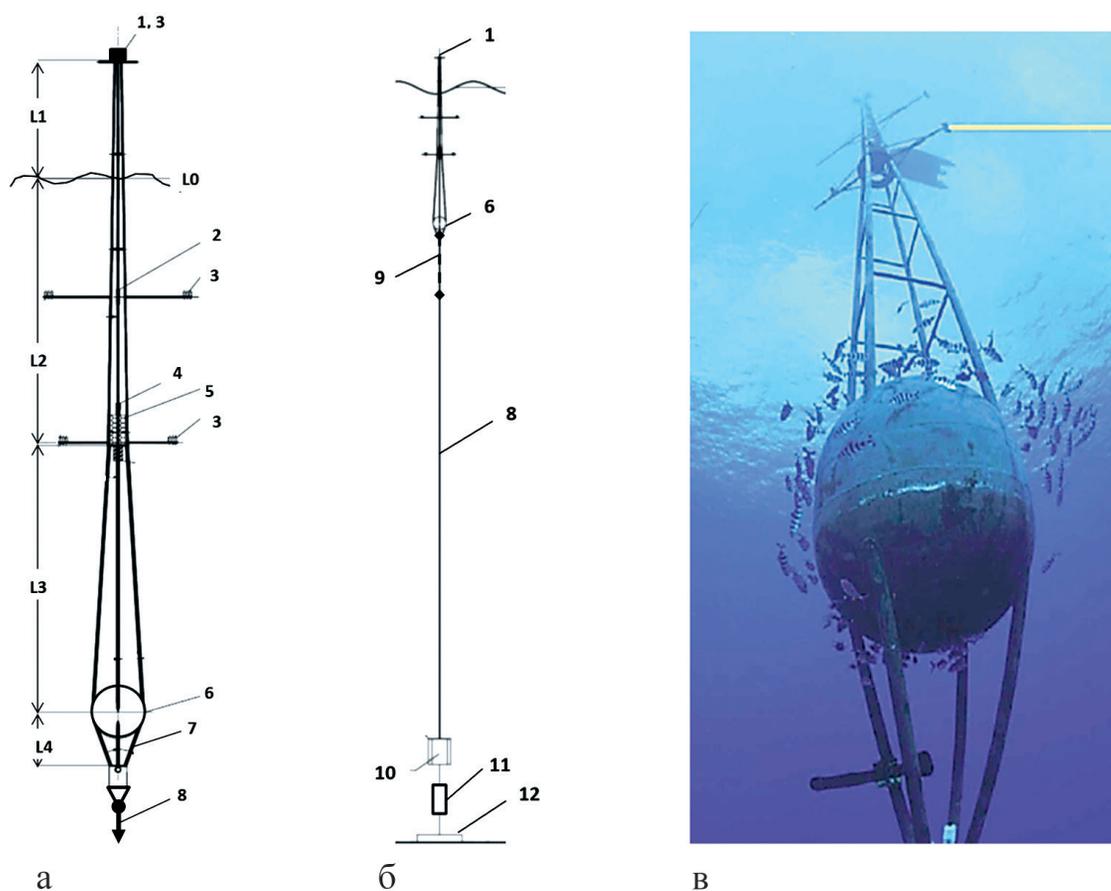


Рис. 3 – Буй «Буссоль»: а) схема буя «Буссоль»; б) схема системы якорения буя; в) внешний вид подводной части; 1 – приемник GPS; 2 – приборная консоль; 3 – опторадометр; 4 – гирокомпас; 5 – компьютер; 6 – основная плавучесть; 7 – тензометр; 8 – буйреп; 9 – сегменты цепи; 10 – добавочная плавучесть; 11 – размыкатель якоря; 12 – якорь. Размеры буя: L1 – 3 м; L2 – 9 м; L3 – 9 м; L4 – 2.8 м

Основной корпус буя 6 (рисунок 3а) представляет собой сферу несколько вытянутой формы с диаметром около 2 м, находящуюся на глубине 18 м. Верхняя часть – мачта-надстройка (L1 + L2) с общей высотой 12 м (3 м над поверхностью) и общей массой 1500 кг (с 10 кг веса приборов вверху). Верхняя часть мачты (L1 + L2) изготовлена из четырех алюминиевых трубок диаметром 0.05 м и соединена внизу с приборной пластиной. Нижняя часть L3 надстройки выполнена из четырех стальных трубок высотой 9 м и диаметром 0.1 м, соединенных вверху с приборной пластиной, а внизу – с корпусом буя.

Нижняя трубчатая часть L4 вверху соединена с корпусом буя, а внизу прикреплена к буйрепу 8. Швартовный буйреп 8 с нейтральной плавучестью длиной 2330 м и диаметром 15 мм изготовлен из кевлара. В нижней части буйрепа находятся плавучесть 10 и размыкатели якоря 11. Бетонный якорь располагается на морском дне на глубине 2350 м, вес его в воде 5 т. Общая плавучесть всей системы составляет около 3 т. Для ее непрерывного измерения между корпусом буя и началом швартовного троса был установлен тензометрический датчик (Antoine et al., 2008).

Следует отметить, что для установки буя такой конструкции необходимо тщательно определять глубину места (до долей метра), точно измерять длину всех элементов буйрепа и учитывать возможные их удлинения при нагрузке и изменении температуры. Для обеспечения некоторой регулировки длины буйрепа в его верхней части имеется цепная вставка 9 (Antoine et al., 2008).

Такая платформа была развернута в глубоких водах (2350 м) северо-западной части Средиземного моря и с сентября 2003 г. обеспечивала практически непрерывную запись оптических свойств на этом участке. В ходе экспериментов была установлена высокая устойчивость платформы по отношению к волнению и сильная зависимость от глубоких течений. При волнении до 2.7 м вертикальные перемещения буя незначительны, наклоны в среднем составляют до 4°. Однако при экстремальных ситуациях, при скорости ветра до 100 км/час и волнах высотой до 7 м, из-за сильного ветрового течения буй может полностью погрузиться в воду. После окончания подобной ситуации буй довольно быстро возвращается в исходное вертикальное положение. Испытания также показали, что некоторые части буя, например, мачта-надстройка, не выдерживает длительной эксплуатации. Поэтому предусмотрена замена буя на восстановление мачты каждые 6 месяцев и замена кевларового буйрепа каждые 2 года (Antoine et al., 2008).

Серьезным недостатком буя «Буссоль» являются возможные погружения под воду при длительных ураганных ветрах, возбуждающих глубокое ветровое течение. Это обстоятельство требует сложных мер для защиты измерительной и связной аппаратуры и GPS. Достаточной мерой представляется добавление нескольких небольших, разнесенных по дну, якорей с легкими швартовыми связями, не нарушающими действие основной силовой швартовки, но ограничивающими боковые отклонения буя. Другим недостатком буя «Буссоль» является частая, через 6 месяцев, смена мачты-надстройки. Вероятно, причина состоит в коррозии, поскольку мачта выполнена из разнородных металлов (алюминий и сталь). Очевидными мерами являются применение химически близких металлов, использование электрохимических

протекторов и т. д. Кардинальным решением было бы применение нейтральных к морской воде материалов, таких как пластмассы или напряженный железобетон. Но эти вопросы требуют специальной проработки.

Стабилизированный буй в системе мониторинга смещения морского дна

Вулканический район Кампи Флегрей на юге Италии включает в себя западную часть города Неаполь и простирается в залив Поццуоли Тирренского моря. Это одна из самых опасных вулканических кальдер в мире из-за высокой плотности населения и ряда промышленных центров. За последние 15 тыс. лет в этой области произошли десятки извержений на суше, но нет сведений об извержениях на дне. В районе развернуто несколько систем постоянного мониторинга, контролируемых Национальным институтом геофизики и вулканологии (INGV-OV), в том числе сейсмологическая, гравиметрическая и геодезическая сети, несколько геохимических станций и др. Однако все эти системы, за исключением нескольких мареографов, расположены на суше. Длительное время для подводной части кальдеры не было никаких измерений (Bevilacqua et al., 2015; Chierici et al., 2016).

В 2008 г. был сделан первый шаг по расширению сети мониторинга с помощью подводной системы сбора данных, развернутой на глубине около 100 м в заливе Поццуоли (Chierici et al., 2016; Iannaccone et al., 2018). Система включала широкополосный сейсмограф и высокоточный регистратор донного давления (BPR). Данные передавались в непрерывном режиме через буй-ретранслятор. С помощью регистратора донного давления в принципе можно определять медленные вертикальные смещения дна по отношению к некоторому усредненному уровню водной поверхности. Однако положение этого уровня очень условно, зависит от волнения, силы и направления ветра и может существенно отличаться в разных частях залива.

Поэтому была разработана другая независимая система измерения движения дна в заливе Поццуоли под кодовым названием MEDUSA («Медуза») с использованием спутниковой навигации и стабилизированных буйев типа «обращенный маятник». Система MEDUSA состоит из четырех буйев и имеет два различных конструктивных решения. Два буя, установленных на глубине моря около 40 м, содержат длинный стальной стержень, соединяющий плавучий корпус и бетонный балласт, лежащий на дне. Два других буя, расположенных на глубине моря около 76 м и 96 м, соединены с балластом стальным тросом. Каждый буй соединен кабелем с донным мультисенсорным модулем, в котором размещены датчик давления PR и сейсмограф (De Martino et al., 2014; Iannaccone et al., 2018).

Использование высокоточных систем GPS для измерения движения морского дна с погрешностью около 1 см требует как стабильности, так и прямой связи с морским дном, а также надежного удержания антенны в известном положении при любых ожидаемых воздействиях ветра, волн и течений. Эти требования диктуют

применение конструкции с длинной мачтой, соединяющей антенну GPS с корпусом буйа особо сильной плавучести, для обеспечения устойчивости системы и тяжелым балластом для фиксирования ее на дне.

На рисунке 4а показана конструкция буйа MEDUSA. Корпус буйа состоит из стальной трубы 3 диаметром 0.22 м и подводного поплавка 4, изготовленного из пено-полиуретана. Верхняя часть трубы находится на несколько метров выше ватерлинии. На ее конце установлен герметичный корпус 2 с электронной аппаратурой и источниками питания. В корпусе находятся приемник GPS, цифровой компас и радиопередатчик системы связи. Антенна GPS 1 и солнечные батареи установлены сверху в центре надстройки. Нижний конец трубы на глубине 14 м соединяется со стальным тросом диаметром 36 мм, который прикреплен к донному якорю весом 14 т. Общая плавучесть буйа составляет около 7 т (Iannassone et al., 2018).

К каждому бую MEDUSA присоединен кабелем донный модуль, в котором размещены геофизические и океанографические датчики, включая широкополосный сейсмометр, MEMS-акселерометр, низкочастотный гидрофон и регистратор давления BPR высокого разрешения на основе кварцевой технологии. Система питания буйа состоит из аккумуляторов, подключенных к солнечным батареям.

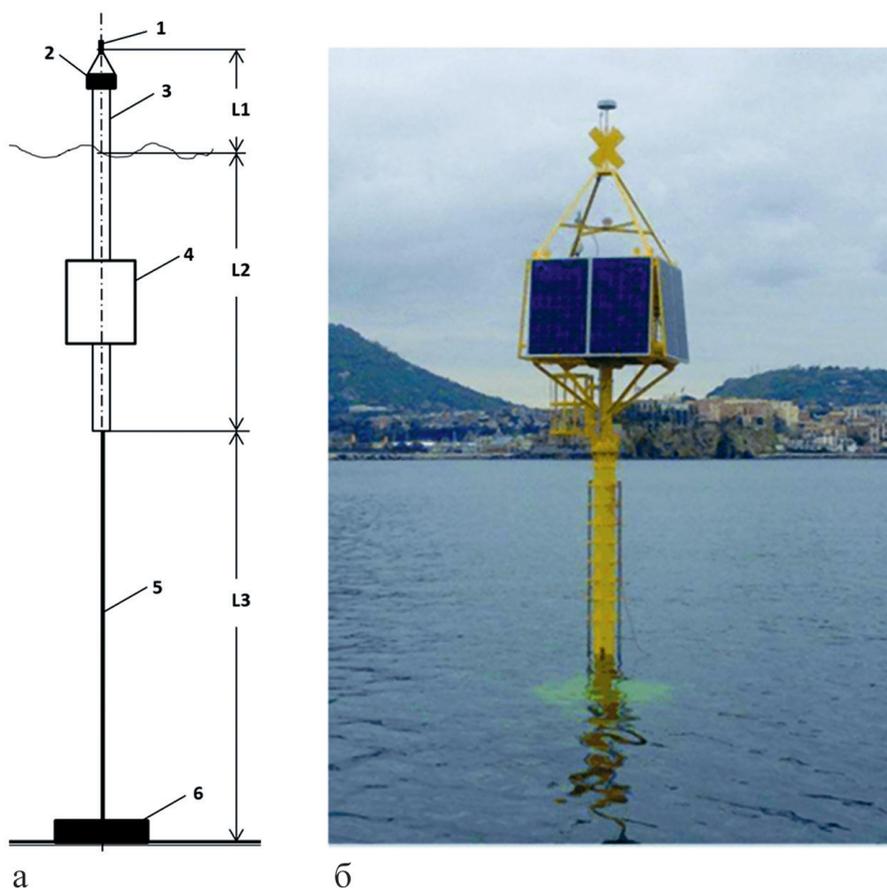


Рис. 4 – Буй MEDUSA: а) схема буйа: 1 – антенна GPS; 2 – приемник GPS гироскоп, радиопередатчик и солнечные батареи; 3 – стальная труба; 4 – плавучесть; 5 – буйреп; 6 – якорь. Размеры буйа: L1 – 6 м; L2 – 14 м; L3 – 83 м; б) внешний вид надводной части после постановки

На рисунке 4б показан внешний вид надводной части буя «Медуза», установленного в районе Кампи Флегрей в заливе Поццуоли, примерно в 2.5 км от побережья, где глубина моря составляет 97 м.

Первые данные от системы «Медуза» были получены в 2016 г. Измеренное максимальное вертикальное поднятие морского дна с апреля 2016 г. по июль 2017 г. составляло около 4.2 ± 0.4 см (Iannaccone et al., 2018).

Принципиальным недостатком буя «Медуза» является значительное смещение ватерлинии при изменении уровня воды. В связи с этим приходится увеличивать длину надводной части буя, и возникают ограничения для его размещения в акваториях с значительными приливами, ветровыми нагонами, высокими волнами и т. п. Можно предложить размещение специальной компенсирующей штанги с калиброванным изменением длины между плавучестью и швартовым тросом. Однако такая конструкция требует серьезной технической разработки, поскольку усилие в швартовом тросе достигает нескольких тонн.

Стабилизированный буй-лонжерон из напряженного железобетона

Основное назначение стабилизированных буюв разных конструкций – обеспечивать необходимые условия для получения длинных временных рядов измерений медленно протекающих процессов, таких как движение тектонических плит в зонах субдукции, колебания дна в местах активной вулканической деятельности, взаимодействие океана и атмосферы при изменениях климата и др. При этом сами буи должны удовлетворять ряду требований: отличаться прочностью и долговечностью конструкции, вносить малые искажения в окружающую среду, быть удобными и экономически выгодными при изготовлении, транспортировке, постановке и последующей утилизации. Однако эти противоречивые требования удовлетворить непросто. Стабилизированные буи обычно имеют довольно большие размеры, сложную конструкцию и изготавливаются в основном из металла, что является одним из серьезных факторов риска из-за сильной коррозии металлов в морской воде.

Морская вода является хорошо аэрированным электролитом с высокой электропроводностью, обусловленной наличием в ней солей с большим содержанием хлоридов, оказывающих депассивирующее действие на металлы. На скорость морской коррозии влияют состав морской воды, ее температура и скорость движения, дополнительный механический фактор (аэрирование, кавитация), контакт разнородных металлов, биологический фактор (обрастание подводной части металлических сооружений морскими растительными и животными организмами) (Лобковский и др., 2005; Шехватов, 2011).

Стабилизированный буй трудно выполнить целиком из однородного металла. Например, в бую «Буссоль» верхняя часть надстройки выполнена из алюминия, а нижняя из стали, что должно привести к электролитической коррозии. В результате планируется менять всю верхнюю часть буя каждые 6 месяцев. Морским реестром

для металлических судов предусмотрен очередной осмотр корпуса каждые 5 лет с последующим ремонтом при необходимости. Для этого суда помещаются в сухой док. Для стабилизированных буюв такая процедура крайне затруднительна и затратна. Кроме того, соединения металлов с морской водой токсичны для морской биоты, что недопустимо по экологическим соображениям. Другой серьезной проблемой становится утилизация металлического стабилизированного буюа после окончания срока службы.

Альтернативным решением в этом случае может быть применение железобетона для изготовления как корпуса стабилизированного буюа, так и элементов якорного крепления.

В Институте океанологии РАН в 2013–2018 гг. был разработан проект стабилизированного буюа-лонжерона из напряженного железобетона для установки на научном полигоне Института в северо-восточной части Черного моря (Badulin et al., 2021). К сожалению, этот проект не удалось реализовать, однако разработанные тогда методы расчета сохраняют актуальность. Ниже приведен новый, более детальный расчет плавучести буюв-лонжеронов с толстыми стенками, соизмеримыми с радиусом корпуса.

Три ключевых преимущества характеризуют предлагаемый железобетонный буй. Во-первых, долговечность по сравнению с металлическими буюами. Современные марки бетона с гидрофобными пропитками могут обеспечить сохранность железобетонных конструкций в морской воде до 40–50 лет без ремонтных работ. Во-вторых, относительно низкая стоимость конструкции из предварительно напряженного железобетона и соответствующие логистические решения для их постановки обещают перспективы их развертывания в разных акваториях Мирового океана и в замкнутых бассейнах. И, наконец, бетонный буй экологически безопасен и легко утилизируется после вывода из эксплуатации.

Отметим сразу особенности железобетона, которые необходимо учитывать при конструировании буюа:

1) Бетон плохо работает на растяжение, поэтому надо использовать железобетон с предварительным сжимающим напряжением, превышающим возможные растягивающие нагрузки.

2) Обычный бетон впитывает морскую воду, которая со временем его разрушает. Для защиты применяются водофобные пропитки или наполнители, такие как жидкое стекло, олеат натрия, сульфат алюминия и др., а также особые проникающие гидроизоляторы, например, типа Пенетрон.

3) Прочность бетона меньше, чем металла, поэтому стенки бетонного буюа должны быть значительно толще. В связи с этим при расчете плавучести буюа необходимо одновременно учитывать радиус корпуса, толщину стенок и плотность бетона.

Можно выделить следующие этапы расчета железобетонного буюа:

- 1) Расчет плавучести буюа.
- 2) Расчет вертикальной и наклонной устойчивости.
- 3) Расчет динамической прочности буюа.
- 4) Расчет усталостной прочности.

В связи с указанными особенностями железобетона требуется специфический расчет предлагаемого буя на первом, третьем и четвертом этапах. Расчет вертикальной и наклонной остойчивости аналогичен для всех буюв лонжеронного типа (Ландау, Лифшиц, 1988; Якубовский, 2017; Newman, 1963). Расчет динамической и усталостной прочности железобетонного буя для конкретных условий северо-восточной зоны Черного моря был подробно представлен в предыдущих публикациях (Badulin et al., 2021). Здесь кратко рассмотрен обобщенный расчет плавучести буя-лонжерона с толстыми стенками.

Примем основную геометрию предлагаемого буя как цилиндрического тела с круглым сечением, хотя в принципе сечение может быть любой формы. Корпус должен иметь достаточную плавучесть, чтобы нести приборы и обеспечить высокую стабилизацию плавучей конструкции с использованием балласта в нижней его части. Схема железобетонного буя-лонжерона представлена на рисунке 5.

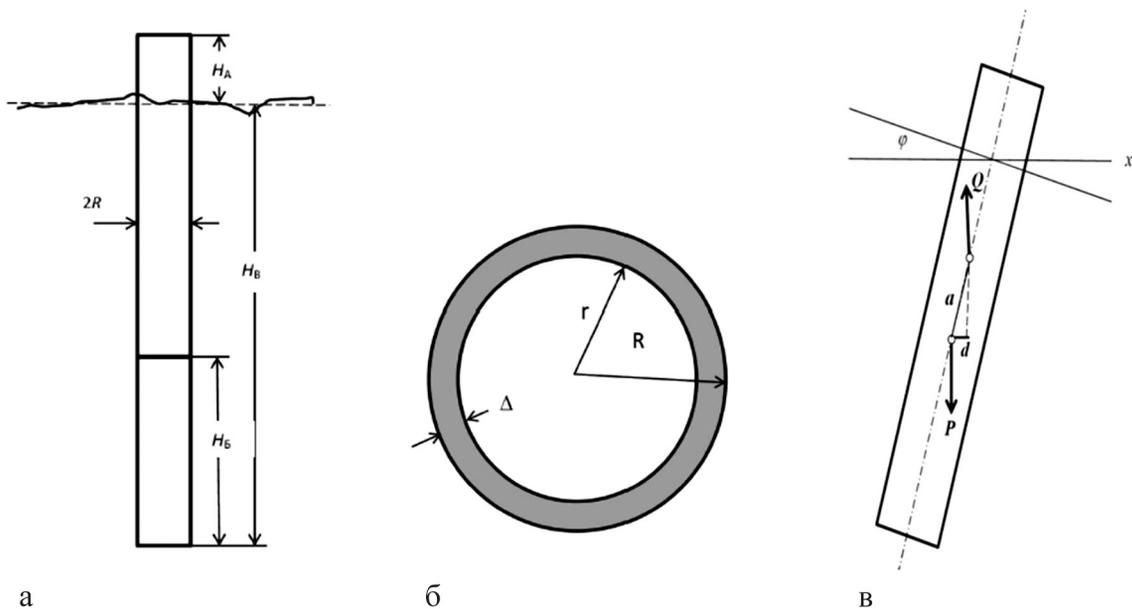


Рис. 5 – Схема железобетонного буя-лонжерона: **а)** – статическое положение буя; **б)** – поперечное сечение буя; **в)** – наклонное положение буя; R – внешний радиус; r – внутренний радиус, H_A – надводная часть; H_B – подводная часть; H_c – высота балласта; x – поверхность акватории; Δ – толщина стенки буя; f – угол наклона буя; P – вес буя; Q – выталкивающая сила; a – расстояние между центрами веса и плавучести; d – плечо восстанавливающего момента

Выразим безразмерное отношение толщины стенки буя Δ к радиусу R , которое определяет относительную плавучесть буя независимо от его длины. Запишем выражения для веса и выталкивающей силы только для корпуса буя с высотой H , без учета веса днища, балласта и других элементов, которые объединим под общим названием «дополнительный вес» и обозначим F :

$$P = \pi(R^2 - r^2)H\rho_c g \quad Q = \pi R^2 H\rho_w g. \quad (1)$$

Из этих выражений, учитывая, что $r = R - \Delta$, получим:

$$\Delta / R = k = (1 - \sqrt{1 - P\rho_w / Q\rho_c}), \quad (2)$$

где ρ_w и ρ_c – плотности воды и бетона соответственно, Q – выталкивающая сила, P – вес корпуса бую. При конструировании железобетонного бую желательно оптимизировать соотношение дополнительного (полезного) веса и общей плавучести, определяемой в основном корпусом бую.

Из (2) следует, что, при заданной плотности воды и бетона, отношение P/Q зависит только от $k = \Delta/R$ и не зависит от длины лонжерона. Если принять среднюю плотность бетона $\rho_c = 2500 \text{ кг/м}^3$ и $\rho_w = 1000 \text{ кг/м}^3$, то при нейтральной плавучести $P = Q$, из выражения (2) следует $k_{\text{lim}} = \Delta/R = 0.225$. Это соотношение можно использовать как контрольное при дальнейших расчетах. При $\Delta/R < 0.225$ и указанной плотности бетона обеспечивается положительная плавучесть.

При минимальной толщине бетонной стенки $\Delta_{\text{min}} = 0.12 \text{ м}$ (диктуется по технологическому регламенту для железобетона) радиус лонжерона должен быть больше 0.533 м . Максимальный радиус может быть ограничен Российским маршрутным кодексом, который запрещает перевозку по обычным дорогам предметов шириной более 2.5 метров без специального разрешения.

Представим выражение для дополнительного веса F через конструктивные элементы корпуса бую и плавучесть. Для укомплектованного бую плавучесть должна равняться сумме $Q = P + F$. Отсюда, учитывая (1):

$$F = Q - P = \pi R^2 H \rho_w g \left\{ 1 - \left[1 - \left(1 - \frac{\Delta}{R} \right)^2 \right] \frac{\rho_c}{\rho_w} \right\} = Q \left(1 - D \frac{\rho_c}{\rho_w} \right), \quad (3)$$

где $D = 1 - \left(1 - \frac{\Delta}{R} \right)^2$ – конструктивный параметр, зависящий только от отношения Δ/R . Для предельного значения $(\Delta/R)_{\text{lim}} = 0.225$ $D_{\text{lim}} = \rho_c/\rho_w = 2.5$. Для максимального диаметра бую в 2.5 м и $\Delta = 0.12 \text{ м}$ $D \approx 0.19$ и $F = 0.525Q$.

Из выражения (3) следует, что для улучшения соотношения между дополнительным (полезным) весом F и общей плавучестью Q необходимо уменьшать параметр D или выбирать более легкий бетон. Марка бетона обычно выбирается заранее, исходя из его прочностных и эксплуатационных свойств, а параметр D определяется на основании нормативных данных и расчета прочности корпуса бую. Абсолютные значения плавучести Q и дополнительного веса F согласно (3) пропорциональны квадрату радиуса R и длине лонжерона H . Радиус бую в соответствии с указанными выше ограничениями должен находиться между 0.533 м и 1.25 м . Длина H оценивается при расчете частоты вертикальных колебаний бую.

Собственная частота вертикальных колебаний является важнейшей характеристикой бую-лонжерона. Оценить ее в первом приближении без учета потерь можно исходя из основных размеров бую. Набегающие волны поднимают бую вверх, преодолевая инерцию его массы. Обозначим вертикальное смещение бую z . Динамическая

сила подъема равна массе вытесняемой воды, умноженной на g : $Q_d = \pi R^2 z \rho_w g$. К массе снаряженного буя, равной массе вытесненной воды в положении равновесия M_w , следует прибавить присоединенную массу жидкости, которая для вертикально перемещающегося цилиндра равна массе вытесненной жидкости, то есть удвоить массу буя $M_w = \pi R^2 H_w \rho_w$. Здесь H_w – длина части буя в воде (Ландау, Лифшиц, 1988; Якубовский, 2017).

Уравнение вертикального движения буя без учета потерь равно:

$$2M_w \ddot{z} = \pi R^2 z \rho_w g \quad \text{или} \quad H_w \ddot{z} = zg. \quad (4)$$

Решение этого уравнения $z = a \sin(\omega t + \varphi)$. Подставляя значение z в (4), получаем выражение для собственной частоты вертикальных колебаний буя:

$$\omega^2 = g / H_w \quad \text{или} \quad f = \sqrt{0,124 / H_w}. \quad (5)$$

Здесь ω – угловая частота (рад/с), H_w – длина части буя в воде (м), f – частота (Гц).

Для экваторий с различным уровнем волнения можно принять три характерные длины корпуса буя-лонжерона 30 м, 60 м и 100 м. Собственные их частоты равны:

Для $H_w = 30$ м, $f = 0.064$ Гц; $H_w = 60$ м, $f = 0.045$ Гц; $H_w = 100$ м, $f = 0.035$ Гц.

Следует отметить, что в последнее время появились новые типы бетонов, более прочных, легких и стойких в морской воде, что открывает богатые возможности для их применения в морских проектах, в том числе для разработки стабилизированных исследовательских буюв.

Выводы

1. Морские стабилизированные буи в настоящее время находят важное применение как носители специальной исследовательской аппаратуры и являются быстро развивающейся частью Глобальной системы наблюдения за океаном (GOOS). От обычных буюв они отличаются большими возможностями размещения сложных измерительных устройств и лучшими условиями их работы, большей энерговооруженностью и большим сроком службы. Стабилизированные буи необходимы для научно-исследовательских работ, которые следует выполнять с помощью бесшумных и малоподвижных платформ. Такие буи имеют ряд преимуществ перед экспедиционными судами, благодаря малым искажениям, вносимым ими в физические поля, хорошей пространственной стабилизации и возможности длительно находиться в фиксированной точке океана.

2. Рассмотрены два принципа стабилизации движения буя: по отношению к водной поверхности и по отношению ко дну и соответственно два способа их реализации. Первый способ для буя типа «лонжерон» можно определить как «инерционный», так как он основан на смещении собственных резонансов в сторону очень низких частот. Другой способ для буя типа «обращенный маятник» можно охарактеризовать как «фиксационный», из-за полужесткой связи плавучести с дном. Хотя конструкции

буйев, в которых применяются эти способы стабилизации, существенно различаются, интересно отметить, что по ряду причин наблюдается частичное их совмещение.

Например, в буйе-лонжероне ASIS верхняя часть выполнена в виде трубчатой конструкции. Это сделано для уменьшения искажений коротких волн при их измерении. Одновременно при этом уменьшается их давление на буй. В другом буйе типа «обратный маятник» в системе «Медуза» корпус содержит длинную вертикальную трубу и сосредоточенную плавучесть посередине. Такая конструкция несколько увеличивает поперечное сечение буя, но делает его более прочным и долговечным.

3. Можно наметить ряд перспективных направлений дальнейшего использования стабилизированных исследовательских буйев. Одним из них является создание совместной сейсмологической и геодезической океанической сети в зонах высокой сейсмической активности. Большая часть сейсмических и вулканических явлений на Земле происходит под дном океанов и морей. Самые сильные землетрясения, сопровождаемые разрушительными цунами, наблюдаются вблизи берегов в зонах субдукции. Деформация морского дна является одним из признаков готовящихся катастрофических событий. Вертикальное смещение дна может определяться с помощью датчиков давления и кабельных линий связи, а горизонтальное – на глубинах менее 100 м с помощью стабилизированных буйев вида «обращенный маятник» и сети GPS, а на больших глубинах с помощью гидроакустических маяков, буйев типа «лонжерон» и GPS. Стабилизированные буи могут при этом служить ретрансляторами сейсмической информации от донных сейсмографов. Применение стабилизированных буйев возможно также при регистрации деформации морского дна в связи с подводными оползнями, добычей углеводородов и их закачкой в подводные резервуары.

4. Другой перспективной областью применения стабилизированных буйев является проведение мониторинга газообмена между океаном и атмосферой. В частности, процесса поглощения и выделения CO_2 , сильно влияющего на парниковый эффект. Под поглощением понимается как непосредственное растворение газа в водах океана, так и переработка его в ходе фотосинтеза и дальнейшей передачи по пищевой цепи. Этот процесс зависит от многих трудно учитываемых факторов. По оценкам в настоящее время океаны хранят около 150 млрд тонн соединений в пересчете на углерод, и каждый год добавляется свыше процента. Однако эти оценки косвенные, полученные на основании математических моделей, которые требуют верификации путем непосредственных измерений в различных районах Мирового океана. Такая сеть длительного физико-химического мониторинга может быть создана с использованием стабилизированных буйев. Эта же сеть могла бы служить для контроля загрязнения океанов и морей полимерным мусором, который очень опасен для морской биоты.

5. В связи с сильной коррозией металлов в морской воде весьма перспективным представляется изготовление корпуса стабилизированных буйев из напряженного железобетона. Металлические морские суда должны проходить сухой осмотр в доках

в сроки от 5 до 10 лет с последующим возможным ремонтом. Такая процедура для стабилизированных буйев крайне сложна и экономически не оправдана. Современные бетоны, хотя и уступают металлам по прочности, но хорошо с ними соединяются, они намного устойчивее в морской воде, более легкие и экологичные. Современные наполнители и пропитки бетонов делают их практически водонепроницаемыми и достаточно твердыми. Кроме чисто научных и производственных задач стабилизированные буи из напряженного железобетона, вследствие их относительной дешевизны и долговечности, могли бы выполнять ряд полезных общехозяйственных функций: служить основой для наблюдения за движением малых местных судов, для трансляции радио и мобильной телефонной связи, для создания местной навигационной сети и др.

6. Методы расчета плавучести и прочности для металлических и железобетонных буйев-лонжеронов имеют свою специфику из-за существенного различия их физико-механических свойств. Рассмотрен обобщенный метод расчета плавучести толстостенного буя-лонжерона.

Благодарности. Исследования выполнены в рамках госзадания ИО РАН (№ FMWE-2021-0004).

Список литературы

1. Берто Г. О. Океанографические буи. Л.: Судостроение, 1979. 215 с.
2. Вайсбанд В. Б., Носков Е. П., Подымов И. С. Стабилизированный буй для установки гидрометеорологической аппаратуры // Метеорология и гидрология. 1974. № 7. С. 99–101.
3. Вайсбанд В. Б. Опыт применения стабилизированных буйев в практике отечественных океанологических исследований. М.: Труды ДВНИГМИ, 1980. Вып. 80. С. 127–141.
4. Грязин Д. Г., Старосельцев Л. П., Белова О. О., Глеб К. А. Волномерный буй «Шторм» с инерциальным микромеханическим измерительным модулем. Результаты разработки и испытаний // Океанология. 2017. Т. 57. № 4. С. 667–674.
5. Краснодубец Л. А. Современное состояние и перспективы развития морских подвижных платформ сбора данных как основы глобальных наблюдательных систем // Системы контроля окружающей среды. 2016. Вып. 26. С. 23–32.
6. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. М.: Наука, 1988. 735 с.
7. Лобковский Л. И., Левченко Д. Г., Леонов А. В., Амбросимов А. К. Геоэкологический мониторинг морских нефтегазоносных акваторий. М.: Наука, 2005. 326 с.
8. Шехватов Б. В. Океанографические буи и буйковые лаборатории. Морская техника и оборудование: Справочник. 2011. (дата обращения: 12.09.2023). <http://seatechnics.ru/okeanograficheskie-bui-i-buikovye-laboratorii>.
9. Якубовский Е. Г. Вычисление присоединенной массы. Russika.ru. Научные публикации. Механика. <https://web.archive.org/web/20180507123310/http://russika.ru/b.php?br=44> (дата обращения 08.08.2023).
10. Antoine D., Guevel P., Deste J. F., Becu G., Louis F., Scott A. J., Bardey P. The “BOUSSOLE” buoy – A new transparent-to-swell taut mooring dedicated to marine optics: Design, tests, and performance at sea // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2008. Vol. 25 (6). P. 968–989. <https://doi.org/10.1175/2007JTECHO563.1>.

11. *Badulin S. I., Vershinin V. V., Levchenko D. G., Ivonin D. V., Zatsepin A. G., Ostrovskii A. G., Lobkovsky L. I.* A project of concrete stabilized spar buoy as a coastal environmental observation and maritime safety platform // *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*. 2021. Vol. 7. P. 115–127. <https://doi.org/10.1007/s40722-021-00190-2>.
12. *Bailey S. W., Werdell P. J.* A multi-sensor approach for the on-orbit validation of ocean color satellite data products // *Remote Sensing of Environment*. 2006. Vol. 102. P. 12–23.
13. *Bevilacqua A., Isaia R., Neri A., Vitale S., Aspinall W. P., Bisson M., Rosi M.* Quantifying volcanic hazard at Campi Flegrei caldera (Italy) with uncertainty assessment: 1. Vent opening maps // *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 2015. Vol. 120. P. 2309–2329. <https://doi.org/10.1002/2014JB011775>.
14. *Cavaleri L., Mollo-Christensen E.* Wave response of a Unauthenticated spar buoy with and without a damping plate // *Ocean Engineering*. 1981. Vol. 8. P. 17–24.
15. *Chadwick W. Jr., Nooner S. L., Butterfield D. A., Lilley M. D.* Seafloor deformation and forecasts of the April 2011 eruption at Axial Seamount // *Nature Geosciences*. 2012. Vol. 5 No. 7. P. 474–477. <https://doi.org/10.1038/NNGEO1464>.
16. *Chierici F., Iannaccone G., Pignagnoli L., Guardato S., Locritani M., Embriaco D., Beranzoli L.* A new method to assess long-term sea-bottom vertical displacement in shallow water using a bottom pressure sensor: Application to Campi Flegrei, southern Italy // *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 2016. Vol. 121. P. 7775–7789. <https://doi.org/10.1002/2016JB013459>.
17. *Clark D. K., Gordon H. R., Voss K. J., Broenkow Y. W., Trees C.* Validation of atmospheric correction over the oceans // *Journal of Geophysical Research*. 1997. Vol. 102. P. 17209–17217.
18. *De Martino P., Guardato S., Tammaro U., Vassallo M., Iannaccone G.* A first GPS measurement of vertical seafloor displacement in the Campi Flegrei caldera (Italy) // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2014. Vol. 276. P. 145–151. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.03.003>.
19. *Fisher F. H., Spiess F. N.* FLIP Floating Instrument Platform // *Journal of the Acoustical Society of America*. 1963. Vol. 35. P. 1633–1644.
20. *Gordon H. R.* Atmospheric correction of ocean color imagery in the Earth Observing System era // *Journal of Geophysical Research*. 1997. Vol. 102. P. 17081–17106.
21. *Graber H. C., Terray E. A., Donelan M. A., Drennan W. M., Vanleer D. B., Peters J. C.* ASIS – A New Air–Sea Interaction Spar Buoy: Design and Performance at Sea // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2000. Vol. 17. P. 708–720.
22. *Gregg W. E.* Ocean-colour data merging. Rep. Int. Ocean Color Coord. Group 6, IOCCG. Dartmouth, Canada, 2007. 68 p.
23. *Livingston L., Roten R., Haas G., Mueller R.* Remote ocean environmental data acquisition. In: *Proc. OCEANS-77 Conference Record*. Los-Angeles. 1977. P. 1–10. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.1977.115442>.
24. *Halkyard J., Horton E. H.* Spar platforms for deep water oil and gas fields // *Marine Technology Society Journal*. 1996. Vol. 30. P. 3–12.
25. *Hellan Q., Leira B., Barrholm R., Erling Heggelund S., Lie H.* Expert evaluation of Boussole buoy design // *Marintek Report*. 700203.00:01. Trondheim. Norway, 2002. 46 p.
26. *Iannaccone G., Guardato S., Donnarumma G. P., De Martino P., Dolce M., Macedonio G., Beranzoli L.* Measurement of seafloor deformation in the marine sector of the Campi Flegrei caldera (Italy) // *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 2018. Vol. 123. P. 66–83. <https://doi.org/10.1002/2017JB014852>.
27. *McClain C. R., Hooker G., Feldman C., Bontempi P.* Satellite data for ocean biology, biogeochemistry and climate research // *Eos. Transactions American Geophysical Union*. 2006. Vol. 87. P. 337–343.

28. *Meindi, A.* Guide to moored buoys and other ocean data acquisition systems // IOP UNESCO. DBCP Techn. Doc. No. 8. 1996. 87 p.
29. *Mollo-Christensen E., Dorman C.* A buoy system for air-sea interaction studies: Buoy design and operation // Mass. Inst. Techn. MITSG72. 25 p.
30. *Newman J. N.* The motions of a spar buoy in a regular waves // Dep. Navy. Dav. Tayl. Model. Bas. 1963. Research Report. 1499. 30 p.
31. *Pinkerton M., Aiken J.* Calibration and validation of remotely sensed observations of ocean color from a moored data buoy // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 1999. Vol. 16. P. 915–923.
32. *Sathyendranath S.* [Ed.] Remote sensing of ocean colour in coastal, and other optically-complex, waters // Rep. Int. Ocean Color Coordinating Group 3, IOCCG. Dartmouth, Canada, 2000. 140 p.
33. Strategy. GOOS-2030. 2021. https://www.goosocean.org/index.php?option=com_content&view=article&id=280&Itemid=419
34. *Trombetti T., Burigana C., De Martino P., Guardato S., Macedonio G., Iannaccone G., Chiericil F.* On the seafloor horizontal displacement from cGPS and compass data in the Campi Flegrei caldera // Journal of Geodesy. 2023. Vol. 97. Article 62. <https://doi.org/10.1007/s00190-023-01751-z>.
35. *Zaneveld J. R., Boss E., Barnard A.* Influence of surface waves on measured and modeled irradiance profiles // Applied Optics. 2001. Vol. 40. P. 1442–1449.
36. *Zibordi G.* A network of standardized ocean color validation measurements // Eos. Transactions American Geophysical Union. 2006. Vol. 87. P. 293–304.

Статья поступила в редакцию 20.08.2023, одобрена к печати 20.09.2023.

Для цитирования: Левченко Д. Г. Современные морские исследовательские стабилизированные буи // Океанологические исследования. 2023. № 51 (3). С. 48–72. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51\(3\).2](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(3).2).

MODERN MARINE RESEARCH STABILIZED BUOYS

D. G. Levchenko

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia,
e-mail: levch35@mail.ru*

Marine stabilized buoys are currently a relatively new and rapidly developing branch of the Global Ocean Observing System (GOOS) (Strategy GOOS-2030. 2021). They find application in a number of topical studies aimed at solving a wide range of problems, including the study of slow or deviant trends, such as seismic and volcanic processes in subduction zones, gas exchange between the ocean and the atmosphere, biooptical observations, etc. The proposed article is of a review nature. Two different types of stabilized buoys are considered: “spar” with motion stabilization relative to the average level of the water surface and “inverted pendulum” with fixation relative to the seabed. Examples are given of a stabilized “spar” type buoy used to study the interaction of the atmosphere and the ocean, two “inverted pendulum” buoys as part of a system for calibrating optical satellite sensors and for monitoring seabed displacement in a zone of volcanic activity. The project of a stabilized buoy of the “spar” design made of stressed reinforced concrete, developed at the IO RAS, is described. The main advantages of such a buoy compared to metal buoys are: durability, environmental friendliness, relative cheapness. The features of the calculation of a buoy of a reinforced concrete structure are considered.

Keywords: buoy-spar, buoy-inverted pendulum, buoy for hydrodynamic research, buoy for calibration of the optical ocean sounding system, buoy in the bottom movement monitoring system, reinforced concrete buoy project

Acknowledgement: Ource of financing: The study is carried out within the framework of the state assignment of the IO RAS (No. FMWE-2021-0004).

References

1. Antoine, D., P. Guevel, J. F. Deste, G. Becu, F. Louis, A. J. Scott, and P. Bardey, 2008: The “BOUSSOLE” buoy – A new transparent-to-swell taut mooring dedicated to marine optics: Design, tests, and performance at sea. *J. Atm. Ocean. Techn.*, **25** (6), 968–989, <https://doi.org/10.1175/2007JTECHO563.1>.
2. Badulin, S. I., V. V. Vershinin, D. G. Levchenko, D. V. Ivonin, A. G. Zatsepin, A. G. Ostrovskii, and L. I. Lobkovsky, 2021: A project of concrete stabilized spar buoy as a coastal environmental observation and maritime safety platform. *J. Oc. Eng. Mar. Energ.*, **7**, 115–127, <https://doi.org/10.1007/s40722-021-00190-2>
3. Bailey, S. W. and P. J. Werdell, 2006: A multi-sensor approach for the on-orbit validation of ocean color satellite data products. *Rem. Sens. Envir.*, **102**, 12–23.
4. Berteaux, H. O., 1976: *Buoy Engineering*. New-York, John Willey and Sons, 210 p., [in Russian].
5. Bevilacqua, A., R. Isaia, A. Neri, S. Vitale, W. P. Aspinall, M. Bisson, and M. Rosi, 2015: Quantifying volcanic hazard at Campi Flegrei caldera (Italy) with uncertainty assessment: 1. Vent opening maps. *J. Geoph. Res. Solid Earth.*, **120**, 2309–2329, <https://doi.org/10.1002/2014JB011775>.
6. Cavaleri, L. and E. Mollo-Christensen, 1981: Wave response of a Unauthenticated spar buoy with and without a damping plate. *Ocean. Eng.*, **8**, 17–24.

7. Chadwick, W. Jr., S. L. Nooner, D. A. Butterfield, and M. D. Lilley, 2012: Seafloor deformation and forecasts of the April 2011 eruption at Axial Seamount. *Nature Geoscience*, **5** (7), 474–477, <https://doi.org/10.1038/NGEO1464>.
8. Chierici, F., G. Iannaccone, L. Pignagnoli, S. Guardato, M. Locritani, D. Embriaco, and L. Beranzoli, 2016: A new method to assess long-term sea-bottom vertical displacement in shallow water using a bottom pressure sensor: Application to Campi Flegrei, southern Italy. *J. Geoph. Res. Solid Earth.*, **121**, 7775–7789, <https://doi.org/10.1002/2016JB013459>.
9. Clark, D. K., H. R. Gordon, K. J. Voss, Y. W. Broenkow, and C. Trees, 1997: Validation of atmospheric correction over the oceans. *J. Geoph. Res.*, **102**, 17209–17217.
10. De Martino, P., S. Guardato, U. Tammara, M. Vassallo, and G. Iannaccone, 2014: A first GPS measurement of vertical seafloor displacement in the Campi Flegrei caldera (Italy). *J. Volc. Geoth. Res.*, **276**, 145–151, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.03.003>.
11. Fisher, F. H. and F. N. Spiess, 1963: FLIP Floating Instrument Platform. *J. Acoust. Soc. Amer.*, **35**, 1633–1644.
12. Gordon, H. R., 1997: Atmospheric correction of ocean color imagery in the Earth Observing System era. *J. Geoph. Res.*, **102**, 17081–17106.
13. Graber, H. C., E. A. Terray, M. A. Donelan, W. M. Drennan, D. B. Vanleer, and J. C. Peters, 2000: ASIS—A New Air–Sea Interaction Spar Buoy: Design and Performance at Sea. *J. Atm. Ocean. Techn.*, **17**, 708–720.
14. Gregg, W. E., 2007: Ocean-colour data merging. *Rep. Int. Ocean Color Coord. Group 6, IOCCG*, Dartmouth, Canada, 68 p.
15. Gryazin, D. G., L. P. Staroseltsev, O. O. Belova, and K. A. Gleb, 2017: Volnomerniy buy “Shtorm” s inertsiyalnym mikromekhanicheskim izmeritelnyim modulem. Rezultaty issledovaniy i ispytaniy (“Storm” wave-gauging buoy with an inertial micromechanical measuring module. Results of research and testing). *Oceanology*, **57** (4), 667–674, [in Russian].
16. Halkyard, J. and E. H. Horton, 1996: Spar platforms for deep water oil and gas fields. *Mar. Techn. Soc. J.*, **30**, 3–12.
17. Hellan, Q., B. Leira, R. Barrholm, S. Erling Heggelund, and H. Lie, 2002: Expert evaluation of Boussole buoy design. *Marintek Rep. 700203.00:01*. Trondheim, Norway, 46 p.
18. Iannaccone, G., S. Guardato, G. P. Donnarumma, P. De Martino, M. Dolce, G. Macedonio, and L. Beranzoli, 2018: Measurement of seafloor deformation in the marine sector of the Campi Flegrei caldera (Italy). *J. Geoph. Res. Solid Earth*, **123**, 66–83, <https://doi.org/10.1002/2017JB014852>.
19. Krasnodubets, L. A., 2016: Sovremennoe sostoyaniye i perspektivy razvitiya morskikh podvizhnykh platform sbora dannykh kak osnovy globalnykh nablyudatelnykh sistem (Current state and prospects for the development of marine mobile data collection platforms as the basis for global observational systems). *Sistemy kontrolya okružhayushchey sredy*, **26**, 23–32, [in Russian].
20. Landau, L. D. and Ye. M. Lifshits, 1988: *Gidrodinamika*. Moscow, Nauka, 735 p., [in Russian].
21. Livingston, L., R. Roten, G. Haas, and R. Mueller, 1977: Remote ocean environmental data acquisition. *Proceeding of OCEANS '77*, Los Angeles, 1–10.
22. Lobkovskiy, L. I., D. G. Levchenko, A. V. Leonov, and A. K. Ambrosimov, 2005: *Geoekologicheskii monitoring morskikh neftegazonosnykh akvatoriy (Geoecological monitoring of marine oil and gas areas)*. Moscow, Nauka, 326 p., [in Russian].
23. McClain, C. R., G. Hooker, C. Feldman, and P. Bontempi, 2006: Satellite data for ocean biology, biogeochemistry and climate research. *Eos, Trans. Amer. Geoph. Union*, **87**, 337–343.
24. Meindi, A., 1996: Guide to moored buoys and other ocean data acquisition systems. *IOP UNESCO. DBCP Techn. Doc.*, **8**, 87 p.

25. Mollo-Christensen, E. and C. Dorman, 1971: A buoy system for air-sea interaction studies: Buoy design and operation. *Mass. Inst. Techn. MITSG72*, 25 p.
26. Newman, J. N., 1963: The motions of a spar buoy in a regular waves. *Dep. Navy. Dav. Tayl. Model. Bas. Res. Rep.*, **1499**, 30 p.
27. Pinkerton, M. and J. Aiken, 1999: Calibration and validation of remotely sensed observations of ocean color from a moored data buoy. *J. Atm. Ocean. Techn.*, **16**, 915–923.
28. Sathyendranath, S. [Ed.], 2000: Remote sensing of ocean colour in coastal, and other optically-complex, waters. *Rep. Int. Ocean Color Coordinating Group*, 3, IOCCG, Dartmouth, Canada, 140 p.
29. Shekhvatov, B. V., 2011: Okeanograficheskiye bui i buykovye laboratorii. (Oceanographic buoys and buoy laboratories). *Morskaya tekhnika i oborudovaniye*, <http://seatechnics.ru/okeanograficheskie-bui-i-buikovye-laboratorii> (last accessed in 08.08. 2023), [in Russian].
30. Strategy. GOOS-2030. 2021. https://www.goosocean.org/index.php?option=com_content&view=article&id=280&Itemid=419.
31. Trombetti, T., C. Burigana, P. De Martino, S. Guardato, G. Macedonio., G. Iannaccone, and F. Chiericil, 2023: On the seafloor horizontal displacement from cGPS and compass data in the Campi Flegrei caldera. *J. Geod.*, 97, Article 62, <https://doi.org/10.1007/s00190-023-01751-z>.
32. Vaysband, V. B., 1980: Opyt primeneniya stabilizirovannykh buyev v praktike otechestvennykh okeanologicheskikh issledovaniy (Experience in the use of stabilized buoys in the practice of domestic oceanological research). *Trudy DVNIGMI*, Moscow, **80**, 127–141, [in Russian].
33. Vaysband, V. B., E. P. Noskov, and I. S. Podymov, 1974: Stabilizirovannyy buy dlya ustanovki gidrometeorologicheskoy apparatury (A stabilized buoy for installing hydrometeorological equipment). *Meteorologiya i gidrologiya*, **7**, 99–101, [in Russian].
34. Yakubovskiy, Ye. G., 2017: *Vychisleniye prisoyedinennoy massy (Calculation of the added mass)*. Russika.ru. Scientific publications. Mechanics, <https://web.archive.org/web/20180507123310/http://russika.ru/b.php?br=44> (last accessed in 08.08.2023), [in Russian].
35. Zaneveld, J. R., E. Boss, and A. Barnard, 2001: Influence of surface waves on measured and modeled irradiance profiles. *Appl. Opt.*, **40**, 1442–1449.
36. Zibordi, G., 2006: A network of standardized ocean color validation measurements. *Eos, Trans. Amer. Geoph. Un.*, **87**, 293–304.

Submitted 20.08.2023, accepted 20.09.2023.

For citation: Levchenko, D. G., 2023: Modern marine research stabilized buoys. *Journal of Oceanological Research*, **51** (3), 48–72, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51\(3\).2](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(3).2).