

УДК 53.082

DOI:10.17586/1023-5086-2018-85-07-33-38

## Некоторые результаты испытаний гидробиофизического комплекса

© 2018 г. Г. И. Долгих\*, \*\*, доктор физ.-мат. наук; С. Г. Долгих\*, \*\*, канд. физ.-мат. наук;  
А. А. Плотников\*, канд. техн. наук; В. А. Чупин\*, \*\*, канд. физ.-мат. наук;  
В. А. Швец\*, \*\*, канд. техн. наук; С. В. Яковенко\*, \*\*, канд. техн. наук

\*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток

\*\*Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

E-mail: dolgikh@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 19.03.2018

Приведены результаты испытаний гидробиофизического комплекса, состоящего из лазерного измерителя вариаций давления гидросферы в частотном диапазоне от 0 (условно) до 1000 Гц с точностью 2,45 мПа и флуориметра. Установлено, что динамика излучения хлорофилла в синей и красной зонах спектра на определенной глубине зависит от гидросферных процессов диапазона ветровых волн, сейш и приливов.

**Ключевые слова:** лазерный измеритель вариаций давления гидросферы, флуориметр, экспериментальные данные, фитопланктон, спектры, ветровые волны, сейши, приливы.

**Коды OCIS:** 260.2510, 120.5475

### ВВЕДЕНИЕ

Основное внимание при изучении динамики первичного продуцента органического вещества в различных водоемах уделялось сезонным, годовым и межгодовым вариациям [1–3]. При этом практически не учитывались мелкомасштабные процессы, которые могут оказывать существенное влияние на динамику цепочки «фитопланктон — зоопланктон — рыбы — морские животные». К мелкомасштабным процессам в этой статье отнесены процессы, лежащие в диапазоне от суточных приливов до ветровых волн, т.е. процессов, диапазон периодов которых составляет от 24 ч до 1 с. В этот диапазон периодов попадают различные гидрофизические процессы периодического и квазипериодического характеров: приливы, инерционные колебания, сейши, внутренние волны, зыбь, региональные ветровые волны. Для изучения связи данных процессов с биомассой первичного продуцента органического вещества необходимо создание комплексов, способных регистрировать любые периодические и квазипериодические вариации основных гидрофизических параметров в рассматриваемом диапазоне периодов, а также вариации численности исследуемой биомассы.

В настоящее время невозможно создать многофункциональный комплекс, который измерял бы все основные гидрофизические параметры. Поэтому при создании комплекса авторы остановились на измерении двух гидрофизических параметров — давления и температуры, оставив без внимания соленость, стратификацию плотности, турбулентные процессы вертикального и горизонтального переноса примесей, течения и др.

В настоящее время созданы лазерные измерители вариаций давления гидросферы (ЛИВДГ) и их модификации [4–6], предназначенные для измерения вариаций гидросферного давления с точностью от 1 мПа до 1 мкПа в частотном диапазоне от 0 (условно) до 1000 Гц. Дополнительно данные установки оснащены высокочувствительными термодатчиками для параллельного измерения вариаций температуры. По частотному диапазону и точности измерения исследуемых параметров рассматриваемые установки являются наиболее подходящими при проведении мониторинговых работ по изучению влияния гидрофизических процессов на различные биологические объекты. Для исследования динамики численности или биомассы первичного продуцента органического

вещества можно использовать флуориметры, обладающие необходимыми для решения поставленных задач техническими характеристиками [7–9].

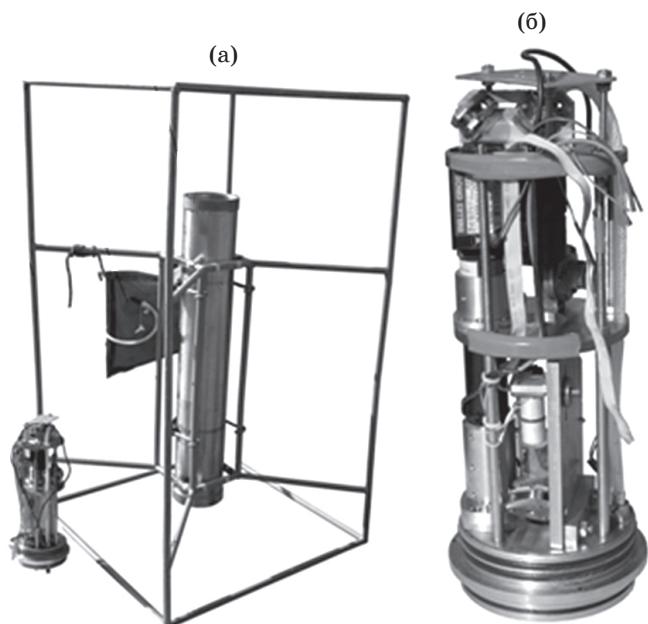
В данной работе поставлена задача по первичному анализу экспериментальных данных, полученных на созданном гидробиофизическом комплексе, состоящем из ЛИВДГ и флуориметра со вспомогательной аппаратурой (аналого-цифровой преобразователь (АЦП), вычислительный комплекс, телекоммуникационные линии).

## ГИДРОБИОФИЗИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

Как было сказано выше, гидробиофизический комплекс состоит из ЛИВДГ (рис. 1а) и флуориметра. Дополнительно он оснащен линиями электропитания и телекоммуникационными линиями для передачи информации с мест установки в береговые лабораторные помещения, многоразрядным АЦП, системой точного времени, компьютером, предназначенный для первичной обработки и записи полученных экспериментальных данных на твердые носители.

На рис. 1б приведен внутренний вид ЛИВДГ, созданного по схеме интерферометра Майкельсона и частотно стабилизированного гелий-неонового лазера фирмы *Melles Griot*. Лазер имеет следующие паспортные данные: длина волны 630 нм, максимальная мощность излучения 1,4 мВт, нестабильность частоты излучения  $10^{-8}$  за 8 ч.

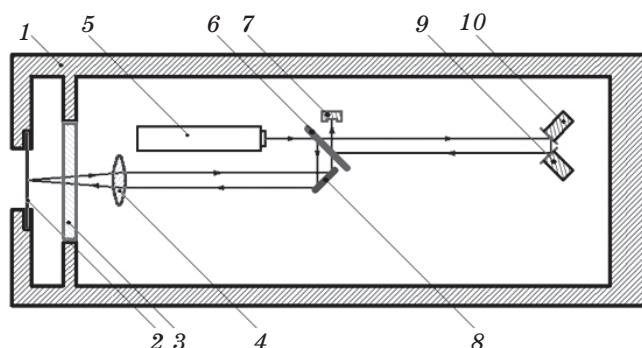
Чувствительным элементом ЛИВДГ является круглая мембрана. Она закреплена в его съемной



**Рис. 1.** Лазерный измеритель вариаций давления гидросферы в собранном состоянии внутри постановочной рамы вместе с эластичной емкостью, наполненной воздухом, — (а) и внутренний вид прибора (б).

крышке таким образом, что одна ее сторона контактирует с водой, а другая — с закрепленным на ней зеркалом, обращена внутрь прибора. При этом зеркало является частью измерительного плеча интерферометра (рис. 2). Работает прибор следующим образом: под действием вариаций давления гидросферы центр мембранны смешается. От этого смещения зависит интенсивность интерференционной картины, которая формируется интерферометром. Изменения интенсивности интерференционной картины регистрирует цифровая система регистрации. Ее выходной сигнал пропорционален изменениям давления гидросферы и является выходным сигналом ЛИВДГ.

Прибор снабжен устройством компенсации внешнего давления, которое необходимо при погружении ЛИВДГ на рабочую глубину, а также при его поднятии. Система компенсации внешнего давления состоит из эластичной емкости с воздухом, которая находится снаружи прибора, отсечного клапана, соединительных трубок и камеры, в которую накачивается воздух. Последняя образована мембраной, оптическим окном и основной крышкой прибора. При погружении и поднятии отсечный клапан находится в открытом положении. При погружении воздух из эластичной камеры под действием давления воды движется по соединительным трубкам через открытый клапан в камеру. При поднятии происходит то же, только в обратном направлении. Таким образом поддерживается постоянное равенство между давлением на внешнюю поверхность мембранны и давлением на ее внутреннюю поверхность. При достижении прибором необходимой для работы глубины клапан закрывается. Все изменения давления после этого момента уже не будут компенсироваться и могут быть зарегистрированы. Таким образом, на любой рабочей глубине начальное рабочее положение центра мембранны остается неизменным.



**Рис. 2.** Оптическая схема ЛИВДГ. 1 — корпус, 2 — мембра закрепленным в центре зеркалом, 3 — оптическое окно, 4 — линза, 5 — частотно стабилизированный гелий-неоновый лазер, 6 — плоскопараллельная делильная пластина, 7 — фотоприемник, 8 — дополнительное зеркало, 9 — пьезокерамика раскачки, 10 — пьезокерамика компенсации.

Как отмечалось выше, зеркало, закрепленное на мемbrane, является частью интерферометра, оптическая схема которого приведена на рис. 2. В основе ее лежит интерферометр Майкельсона, источником излучения которого является частотно стабилизированный гелий-неоновый лазер. Луч лазера попадает на плоскопараллельную делительную пластину, которая делит его на два луча — измерительный и опорный. Первый луч (измерительный) с помощью дополнительного зеркала направлен на линзу, далее через оптическое окно на зеркало, закрепленное на мемbrane. Оптическое окно предназначено для пропускания в компенсационную камеру лазерного луча. После отражения от зеркала, закрепленного на мемbrane, луч снова попадает сначала на линзу, а потом с помощью дополнительного зеркала на делительную пластину, от которой он направляется на фотодиод. Второй луч (опорный) после делительной пластины проходит через систему управляющих зеркал, установленных на пьезокерамических основаниях. Далее он, как и измерительный луч, попадает на фотодиод. На фотодиоде с помощью этих двух лучей настраивается интерференционная картина.

Рассмотрим работу интерферометра при измерении вариаций гидросферного давления. В начальный момент работы интерферометр настроен таким образом, что интерференционная картина на его выходе имеет максимум интенсивности. Во время работы изменения гидросферного давления на мемbrane приводят к смещению ее центра относительно положения равновесия, что в свою очередь приводит к изменениям длины измерительного плеча интерферометра и интенсивности интерференционной картины. Интерферометр управляет системой регистрации, одной из задач которой является удерживание интенсивности интерференционной картины на максимуме. Для этого система регистрации, реагируя на изменения яркости интерференционной картины, регистрируемые фотоприемником, вырабатывает высокое напряжение и подает его на пьезокерамику компенсации, которая вместе с установленным на нее зеркалом входит в состав опорного плеча интерферометра. В зависимости от напряжения пьезокерамика компенсации сжимается или разжимается, что приводит к увеличению или уменьшению длины опорного плеча интерферометра. Таким образом, система регистрации компенсирует разницу между длиной опорного плеча и длиной измерительного плеча, удерживая интерференционную картину в максимуме интенсивности. При достижении на пьезокерамике компенсации порогового напряжения замыкаются ключи системы сброса уровней, напряжение на пьезокерамике обнуляется и она переходит в нейтральное положение. При этом значение порогового напряжения подбирается равным напряжению,

которое обеспечивает сжатие/растяжение пьезокерамики на  $\lambda_l/2$ , где  $\lambda_l$  — длина волны излучения гелий-неонового лазера. Таких «скачков» одного знака может быть сколько угодно. Их количество ограничивается прочностными характеристиками мембранны и качеством интерференционной картины. Экспериментально было установлено, что при смещении центра мембранны на 5 мм (диаметр ненагруженной части мембранны — 10 см, толщина — 1 мм) прибор работает достаточно качественно. Истинная картина восстанавливается суммированием «скачков», умножением количества «скачков» на значение сброса с прибавлением соответствующей доли сброса между соседними «скачками» для конкретного отчета при оцифровке данных. Максимальное смещение центра мембранны ограничено расстоянием от отражающего зеркала, установленного на мембранны, до оптического окна, отсекающего компенсационную камеру от внутренней части ЛИВДГ. Оно составляет примерно 7,3 мм. При значительном увеличении внешнего давления мембранны просто «упирается» в окно и дальше не отслеживает изменение гидросферного давления.

Применяемые в приборе методы интерферометрии позволяют измерять смещение мембранны с точностью до третьего—четвертого знака от  $\lambda/2$ , что соответствует 0,3–0,03 нм. При этом точность измерения вариаций гидросферного давления можно оценить по формуле для круглой мембранны, закрепленной на краях [10],

$$\Delta P = (16\Delta l h^3 E) / (3(1-\sigma^2)R^4),$$

где  $\Delta l$  — смещение центра мембранны,  $h$  — толщина мембранны,  $E$  — модуль Юнга,  $\sigma$  — коэффициент Пуассона,  $R$  — диаметр мембранны. В установках задействовались мембранны со следующими характеристиками: диаметр 12 см (рабочий диаметр 11 см), толщины мембранны 1,0, 0,5 и 0,3 мм, материал — нержавеющая сталь ( $E = 2,1 \times 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>,  $\sigma = 0,25$ ). При  $h = 1$  мм и  $\Delta l = 0,3$  нм  $\Delta P = 2,45$  мПа; при  $h = 0,5$  мм и  $\Delta l = 0,3$  нм  $\Delta P = 0,3$  мПа; при  $h = 0,3$  мм и  $\Delta l = 0,3$  нм  $\Delta P = 0,07$  мПа. При уменьшении толщины мембранны до 0,1 мм точность измерения  $\Delta P$  можно поднять до 2,45 мкПа. Но данный прибор был испытан только в бассейне. В экспериментах, в основном, задействовали прибор с толщиной мембранны, равной 1 мм, и рабочим диаметром 11 см. Предельная амплитуда давления, которую может измерить этот прибор (при свободном ходе мембранны — 7,3 мм), составляет 60 кПа. При такой амплитуде он может зарегистрировать стоячую волну (стоячая ветровая волна, сейши и др.) амплитудой 3,05 м (высота волны — 6,1 м). Прогрессивная волна (ветровая волна, зыбь, прилив и др.) вызовет изменение давления на глубине  $H = 8$  м, равное  $P = (\rho g a)/ch(kH)$  [11],



**Рис. 3.** Флуориметр СЗ.

где  $\rho$  — плотность воды,  $g$  — ускорение свободного падения,  $a$  — амплитуда волны,  $k$  — волновое число,  $H$  — глубина погружения прибора. В случае ветровой волны (зыбы) с периодом 10 с и длине волны порядка 156 м в предельном случае ( $\Delta l = 7,3$  мм)  $a = 6,4$  м, а при  $\Delta l = 5$  мм  $a = 4,4$  м.

Лазерный измеритель вариаций давления гидросфера длительное время использовался как одиночный прибор. Наиболее продолжительный ряд наблюдений при его размещении в бухте Витязь на глубине 18 м составил 16 месяцев (сентябрь 2009 – декабрь 2010).

В постановочной раме рядом с ЛИВДГ закреплен флуориметр СЗ, внешний вид которого приведен на рис. 3. Погружной флуориметр СЗ [7], изготовленный компанией *Turner Designs*, укомплектован двумя светочувствительными датчиками *in vivo* для измерения люминесценции хлорофилла фитопланктона в синей (460 нм) и красной (635 нм) зонах видимого спектра. Диапазон длин волн синего излучения позволяет зафиксировать концентрацию в интервале 0,025–500 мкг/л, диапазон красного излучения — более 500 мкг/л. Прибор также укомплектован датчиками давления и температуры. Долговечный корпус сделан из полиформальдегида *Delrin*, что позволяет работать в агрессивной морской среде. Поверхности корпуса возле оптических датчиков комплектуются медными вставками для снижения биологического загрязнения светочувствительных элементов. Масса прибора — 1,64 кг, длина — 23 см, диаметр — 10 см, диапазон температур от –2 до 50 °С. Глубина погружения до 600 м. Максимальная дискретность получения данных 1 Гц. Флуориметр обладает возможностью вывода цифровых данных в формате ASCII, либо получения аналоговых данных при наличии соответствующего адаптера.

Вся полученная информация измерительных установок комплекса по кабельным линиям поступает в береговой лабораторный корпус, где после предварительной обработки заносится в созданную базу экспериментальных данных.



**Рис. 4.** Место установки ЛИВДГ и флуориметра.

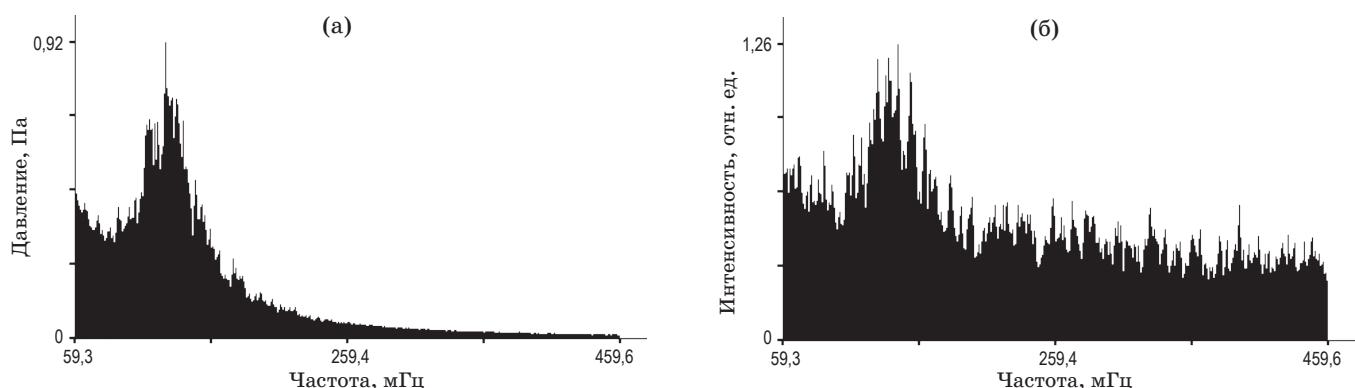
## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ КОМПЛЕКСА

Для проведения испытаний комплекс был установлен на глубине 8 м в бухте Витязь залива Посьета Японского моря (см. рис. 4).

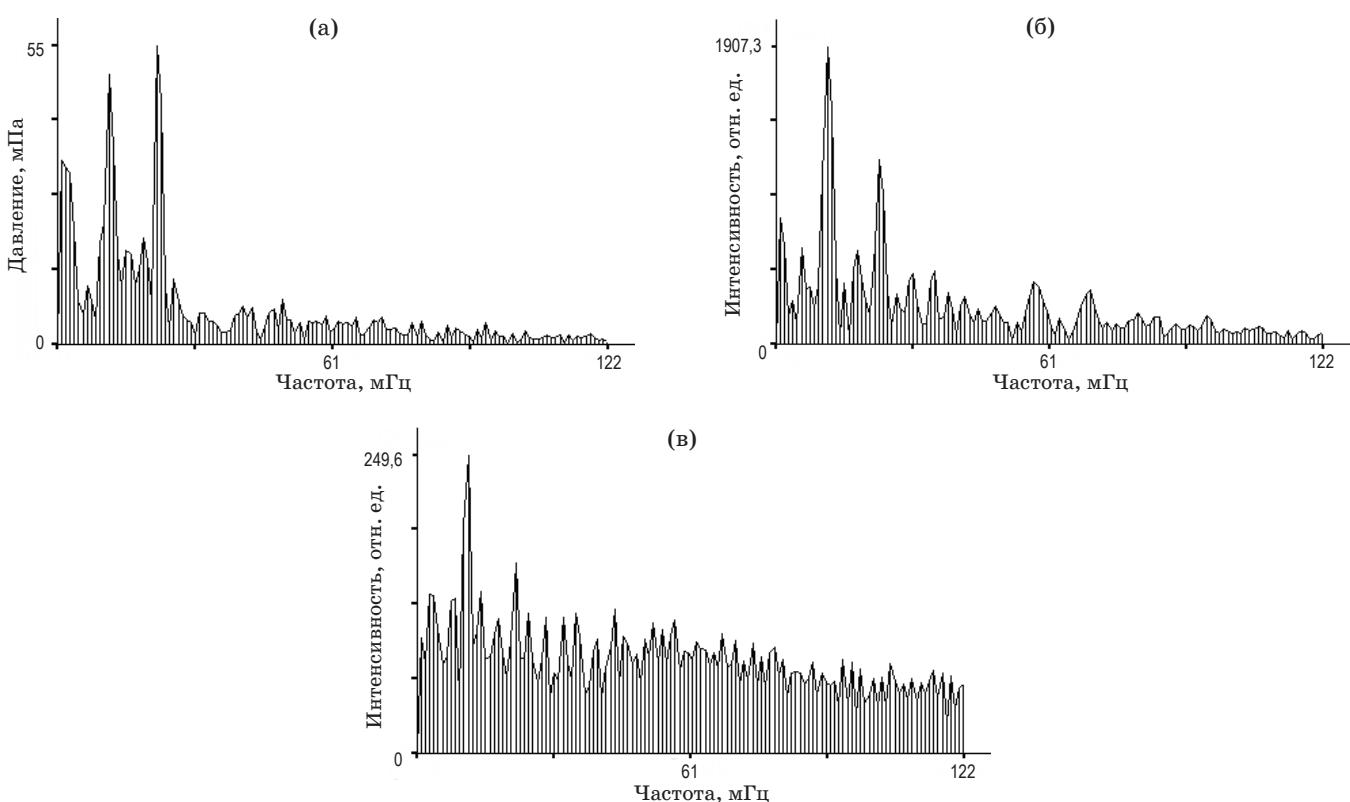
Запись проводилась в течение нескольких недель. Полученная информация с регистрационных установок комплекса по кабельным линиям подавалась на пишущий компьютер, расположенный в приборном домике (см. рис. 4). В дальнейшем, после предварительной фильтрации низкочастотным фильтром Хэмминга и децимацией, данные ЛИВДГ помещались в организованную базу с частотой дискретизации 1 Гц. Параллельно в эту же базу заносились данные флуориметра. Таким образом, после обработки синхронных данных ЛИВДГ и флуориметра можно судить о процессах с периодами выше 2 с. В этом диапазоне периодов находятся ветровые волны, инфрагравитационные морские волны, внутренние волны, сейши, инерционные колебания, приливы.

При обработке синхронных экспериментальных данных ЛИВДГ и флуориметра в диапазоне ветровых морских волн установлено, что колебания показаний флуориметра коррелируют с изменением интенсивности ветрового волнения. Период колебаний показаний флуориметра равен периоду колебаний ветрового волнения. На рис. 5 приведены спектры, полученные при обработке синхронных экспериментальных данных флуориметра и ЛИВДГ. Максимум соответствует периоду около 8 с, т.е. равен периоду волн зыби, пришедших в бухту с открытой части Японского моря.

При обработке длительных рядов наблюдения выделены колебания, соответствующие суточному и полусуточному неправильному приливу. На рис. 6 приведены спектры, полученные при обра-



**Рис. 5.** Спектры синхронных участков записей ЛИВДГ (а) и флуориметра (б).



**Рис. 6.** Спектры синхронных данных ЛИВДГ (а) и флуориметра (б – спектр в синей зоне, в – спектр в красной зоне).

ботке синхронных записей ЛИВДГ и флуориметра (в синей и красной зонах спектра).

Интересную особенность можно отметить по этим результатам: если для морского прилива характерно, что полусуточный максимум больше суточного, то полусуточные максимумы в обоих зонах спектра, зарегистрированные флуориметром, меньше суточного. Возможно это связано с режимом освещенности водной поверхности Солнцем.

Кроме того, при обработке отдельных рядов наблюдения в данных флуориметра выделены флуктуации с периодом около 17–18 мин, которые характерны для сейш бухты Витязь [12].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенная натурная апробация гидробиофизического комплекса, состоящего из ЛИВДГ и флуориметра, показала его большие перспективы при изучении природы вариаций первичного продуцента органического вещества, связанных с основными колебательными гидросферными процессами диапазона периодов от ветровых волн до приливов. При этом установлено сильное влияние ветрового волнения и приливов на динамику биомассы фитопланктона.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РНФ (соглашение №14-50-00034).

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Стародубцев Е.Г., Логинов А.А., Захарков С.П. Хлорофилл «А» в северо-западной части Тихого океана // Океанология. 1988. Т. 28. № 1. С. 122–126.
2. Кульчин Ю.Н., Букин О.А., Константинов О.Г., Вознесенский С.С., Павлов А.Н., Гамаюнов Е.Л., Майор А.Ю., Столярчук С.Ю., Коротенко А.А., Попик А.Ю. Комплексный контроль состояния морских акваторий оптическими методами. Часть 1. Концепция построения многоуровневых измерительных систем для экологического мониторинга прибрежных акваторий // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 7. С. 633–637.
3. Гольдин Ю.А., Шатравин А.В., Левченко В.А., Венцкут Ю.И., Гуреев Б.А., Копелевич О.В. Исследование пространственной изменчивости интенсивности флуоресценции морской воды в западной части Черного моря // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2015. Т. 8. № 1. С. 17–26.
4. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалёв С.Н., Швец В.А., Чупин В.А., Яковенко С.В. Лазерный измеритель вариаций давления гидросферы // Приборы и техника эксперимента. 2005. № 6. С. 137–138.
5. Dolgikh G., Dolgikh S., Kovalyov S., Chupin V., and Yakovenko S. Super-low-frequency laser instrument for measuring hydrosphere pressure variations // J. Marine Sci. and Technol. 2009. V. 14. № 4. P. 480–488.
6. Долгих Г.И., Плотников А.А., Будрин С.С. Мобильный лазерный измеритель вариаций давления гидросферы // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 4. С. 161–162.
7. Mayerfeld P., Brumett T. C3 Submersible Fluorometer: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.turnerdesigns.com/t2/doc/presentations/C3-Ocean-Bus-Presentation-2009.pdf> (Дата обращения 28.04.2017).
8. ECO FL Fluorescence sensor // Sea Bird Scientific. [Электронный ресурс]. URL: [http://wetlabs.com/sites/default/files/documents/2016\\_datasheet\\_ECObb161205\\_0.pdf](http://wetlabs.com/sites/default/files/documents/2016_datasheet_ECObb161205_0.pdf) (Дата обращения 28.04.2017).
9. Seapoint Chlorophyll Fluorometer [Электронный ресурс] URL: <http://www.seapoint.com/scf.htm> (Дата обращения 28.04.2017).
10. Ландau Л.Д., Лишиц Е.М. Теоретическая физика. Теория упругости. М: Наука, 1987. Т. 7. 248 с..
11. Бойден К. Физическая океанография прибрежных вод. М.: Мир, 1988. 326 с.
12. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Смирнов С.В., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В. Инфразвуковые колебания Японского моря // Доклады Академии Наук. 2011. Т. 441. № 1. С. 98–102.