

# МНОГОЦЕЛЕВОЙ АВТОНОМНЫЙ МОДУЛЬ ДЛЯ СЕТЕВЫХ ПОДВОДНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ БИООПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МОРСКОЙ ВОДЫ

В.А. Крикун, А.А. Коротенко, П.А. Салюк

Федеральное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН<sup>1</sup>

Для решения многих фундаментальных и прикладных задач в океанологии не хватает регулярных измерений, производимых в водной толще или подо льдом. Организация морских экспедиций является дорогим мероприятием, спутниковое оптическое зондирование обеспечивает измерение только в приповерхностном слое моря с существенными ошибками в водах второго оптического типа и не работает при наличии облачности или ледового покрова, сети автономных буев с оптическими датчиками являются крайне малочисленными в мировом масштабе. В работе описаны результаты разработки недорогого многоцелевого автономного оптического модуля для сетевых и/или комплексных измерений флуоресценции морской воды. Актуальность исследования определяется необходимостью создания автономных сетей глобального подводного наблюдения за биооптическими параметрами морской воды. Научная новизна исследования состоит в разработке универсальных оптических модулей, которые как могут быть скомбинированы в сложный единый комплекс для гидрооптических исследований, так и поодиночке организованы в распределенную сеть гидрооптических измерений. Данное решение позволит создать универсальную систему подводных гидрооптических измерений, а также модернизировать существующие подводные аппараты и приборы, не имеющие оптических датчиков.

## ВВЕДЕНИЕ

При комплексном мониторинге природных и антропогенных процессов, происходящих в морской толще, значительную роль играют данные, полученные в результате натурных измерений *in situ* на разных глубинных горизонтах. Проведение такого рода работ зачастую является мероприятием, требующим значительных финансовых и временных затрат. Одним из решений данной проблемы является использование автономных подводных станций, расположенных в определенных точках акватории и на протяжении длительного времени регистрирующих различные параметры морской воды без вмешательства человека. Важным при организации такого мониторинга является стоимость отдельных датчиков, которая должна позволить проводить распределенные сетевые измерения на обширных акваториях. В этом отношении широкое распространение имеют системы по измерению основных гидрофизических параметров, таких как температура, соленость и глубина, в виде гидрологических гирлянд [1], дрейфующих и заякоренных буев [2, 3].

Дополнительную полезную информацию можно получить с помощью оптических флуоресцентных датчиков, измеряющих флуоресценцию хлорофилла-а или растворенных органических веществ (РОВ). Известны научные работы, в которых измерения биооптических (гидрооптических параметров, изменяющихся в результате жизнедеятельности живых организмов) параметров морской воды проводились при помощи прибрежных автоматических станций и биогеохимических версий буев Argo, что позволило получить новые данные о динамике процессов, происходящих в морской толще [4, 5]. Известны также работы, в которых измерения биооптических параметров проводились с использованием телеуправляемых аппаратов [6]. При этом стоимость подводных оптических датчиков, измеряющих флуоресценцию морской воды, достаточно высока, что ограничивает их широкое использование в виде самостоятельных отдельных измерительных узлов. Поэтому, как правило, в качестве носителей используются глайдеры,

<sup>1</sup> 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43. Тел.: +7 (423) 2312579.  
E-mail: pacific@poi.dvo.ru

буи Арго, автономные вертикальные зондирующие станции [7], либо измерения проводятся всего в нескольких точках. Практически отсутствуют решения, которые могут быть использованы в качестве широкой распределенной сети измерителей на разных глубинных горизонтах и в разных точках водного пространства по аналогии с термогирляндами [8]. Такое использование датчиков имеет свои преимущества по одномоментной регистрации процессов, происходящих в морской толще [9, 10]. И в зависимости от акватории и решаемой задачи данная система может иметь эксплуатационные преимущества.

Современный уровень развития техники позволяет существенно снизить стоимость биооптических датчиков. Использование полупроводниковых приборов дает возможность отказаться от использования хорошо зарекомендовавших себя, но дорогостоящих решений в пользу более дешевых компонентов. В частности, в статьях [11–15] показаны преимущества использования мощных светодиодов в качестве источников возбуждения флуоресценции. В статьях [16, 17] описаны приборы, в которых в качестве регистратора излучения флуоресценции успешно используются чувствительные фотодиоды. В работе [18] описан не дорогой лабораторный флуориметр, использующий в качестве источника возбуждения мощный светодиод, а в качестве приемника излучения – полупроводниковый оптический преобразователь TSL257 (фотодиод с усилителем в одном корпусе).

В данной статье описаны результаты разработки недорогого многоцелевого автономного универсального оптического модуля (УОМ) для сетевых и/или комплексных подводных измерений флуоресценции морской воды. Стоимость комплектующих и материалов, используемых при изготовлении автономного модуля в комплектации с четырьмя датчиками (УОМ-4а), не превышает 500\$ US, стоимость комплектующих для модуля, содержащего только датчик флуоресценции УОМ-1 – 100\$ US. Целевым экономическим показателем модуля является десятикратное понижение цены относительно доступных коммерческих аналогов, без существенного ухудшения функциональных характеристик, что позволит создать новую сферу применения подводных биооптических приборов. Модуль может быть изготовлен с набором различных регистрирующих датчиков, в частности датчика давления, датчика мутности и т.п., а также в виде модификаций для измерения различных компонентов флуоресценции морской воды: пигменты фитопланктона, белковые и гуминовые РОВ, нефтепродукты, путем комбинирования длин

волн возбуждающего и испускаемого излучения флуоресценции [19]. В дальнейшем такое решение позволит создать универсальную систему подводных гидрооптических измерений, а также модернизировать существующие подводные аппараты и приборы, не имеющие оптических датчиков.

## ■ Описание прибора

Разработанный опытный образец оптического модуля УОМ-1а способен находиться длительное время в исследуемой акватории в толще воды и позволяет, в зависимости от конфигурации установленных датчиков, регистрировать флуоресценцию морской воды при различных комбинациях длин волн возбуждающего и испускаемого излучений флуоресценции при настраиваемых интенсивностях и длительностях излучения. Цифра «1» в названии модели указывает на количество измеряемых оптических параметров. Дополнительная буква «а» указывает, что прибор выполнен в «автономном» варианте с возможностью измерять давление, записывать результаты измерений во внутреннюю память и собственным аккумулятором. Это позволяет использовать модуль в качестве самостоятельного прибора при гидрооптических исследованиях.

Оптический модуль спроектирован таким образом, чтобы в перспективе, на основе схемотехнических решений, заложенных в его основу, с минимальными изменениями, изготовить модули, которые позволят измерять другие оптические характеристики в толще морской воды, в частности: освещенность, рассеяние и ослабление светового потока. Также, в перспективе все модули будут снабжены интерфейсами, через которые будет возможно объединить их в единый комплекс оптических модулей для проведения распределенных подводных измерений. Кроме того, модуль имеет предельную глубину погружения 100 м и обладает возможностью регистрировать профили изменения интенсивности флуоресценции по глубине.

Корпус оптического модуля и все детали модуля изготовлены из PETG (полиэтилентерефталат) пластика и напечатаны на 3D принтере методом тепловой экструзии пластика (Fused Deposition Modeling – FDM). Корпус армирован четырьмя металлическими стержнями с диаметром 5 мм. Для увеличения герметичности корпус изнутри частично заполнен эпоксидной смолой (рис. 1).



Рис. 1. Фотография опытного образца оптического модуля УОМ-1а

Разработанный образец оптического модуля УОМ-1а настроен на измерение флуоресценции хлорофилла-а и работает следующим образом (см. рис. 2). Возбуждающее излучение генерируется при помощи мощного светодиода с максимумом в диапазоне длин волн 460–470 нм с шириной полосы 40 нм (1). При этом люминофор светодиода дает равномерную засветку в широком спектральном интервале от 300 до 800 нм, которая рассеивается в морской воде и, попадая на фотоприемник, искажает регистрируемый полезный сигнал. Для того чтобы нивелировать этот негативный эффект, сразу после светодиода расположен интерференционный полосовой оптический фильтр, объединенный с синим оптическим стеклом марки QB5 (2), эта сборка пропускает излучение в диапазоне длин волн от 400 до 550 нм. При помощи линзы (3) световой поток фокусируется в морскую среду для возбуждения флуоресценции хлорофилла-а, излучение от которой равномерно

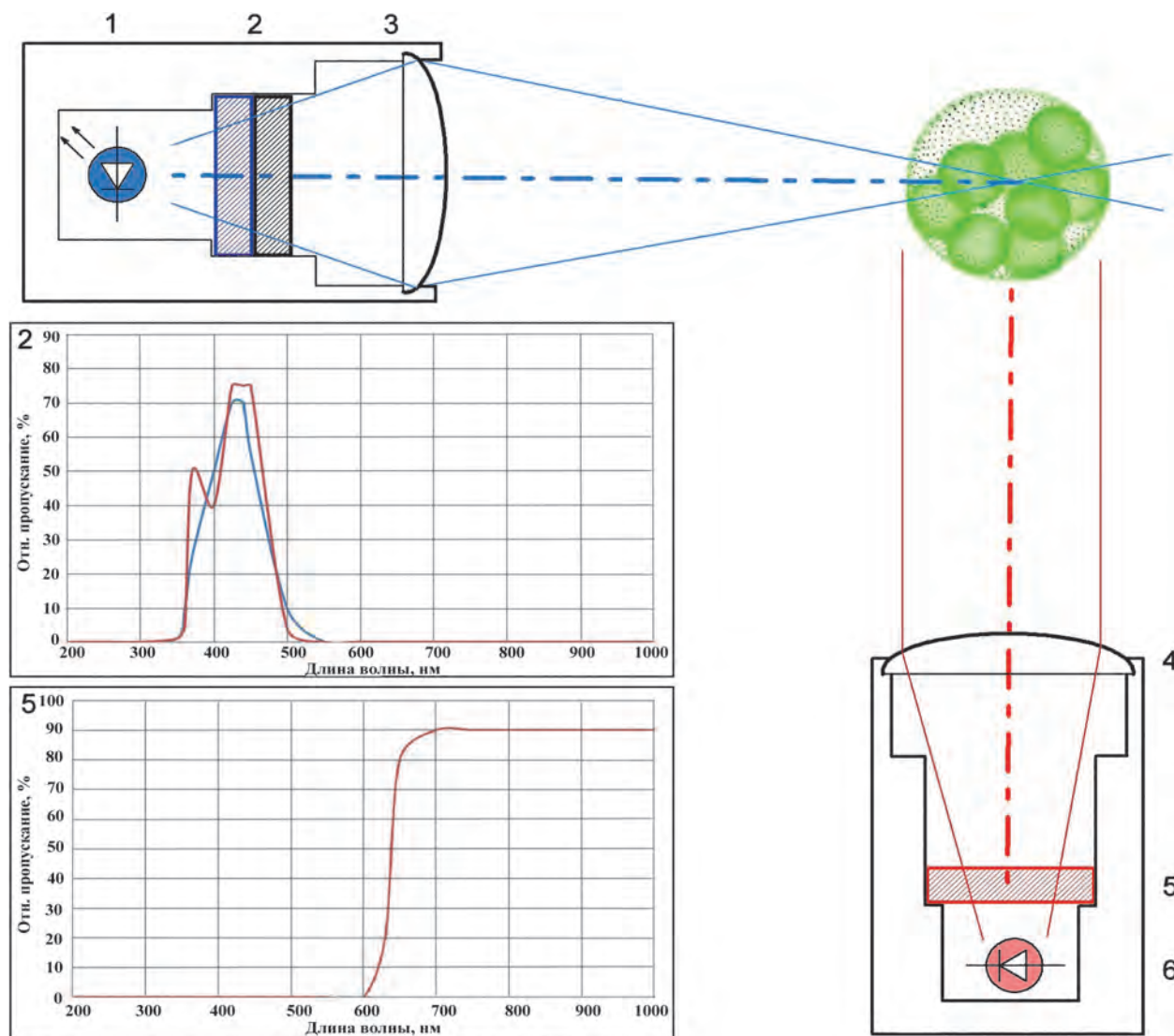


Рис. 2. Оптическая схема модуля УОМ-1

распространяется по всем направлениям. Испускаемое фитопланктоном излучение фокусируется на фотоприемнике (6) при помощи собирающей линзы (4), расположенной под углом 90° к оптической оси источника излучения. Для того чтобы исключить сигнал упругого рассеяния в регистрирующей системе, используется длинноволновый фильтр (5), пропускающий излучение более 630 нм.

Излучение флуоресценции, преобразованное оптическим преобразователем TSL257 в электрическую форму, оцифровывается при помощи АЦП типа MCP3421 и обрабатывается микроконтроллером

PIC18F2550 (см. рис 3). Микроконтроллер производит усреднение измерений и сохраняет результаты в микросхему EEPROM памяти AT24C512 объемом 65 кбайт. Также микроконтроллер использует показания часов реального времени DS1307 для привязки результатов измерений ко времени. В дальнейшем, после окончания процесса регистрации, прибор при помощи цифрового интерфейса подключается к персональному компьютеру, на который передаются результаты всех измерений.

В табл. 1 представлены основные технические характеристики разработанного флуоресцентного

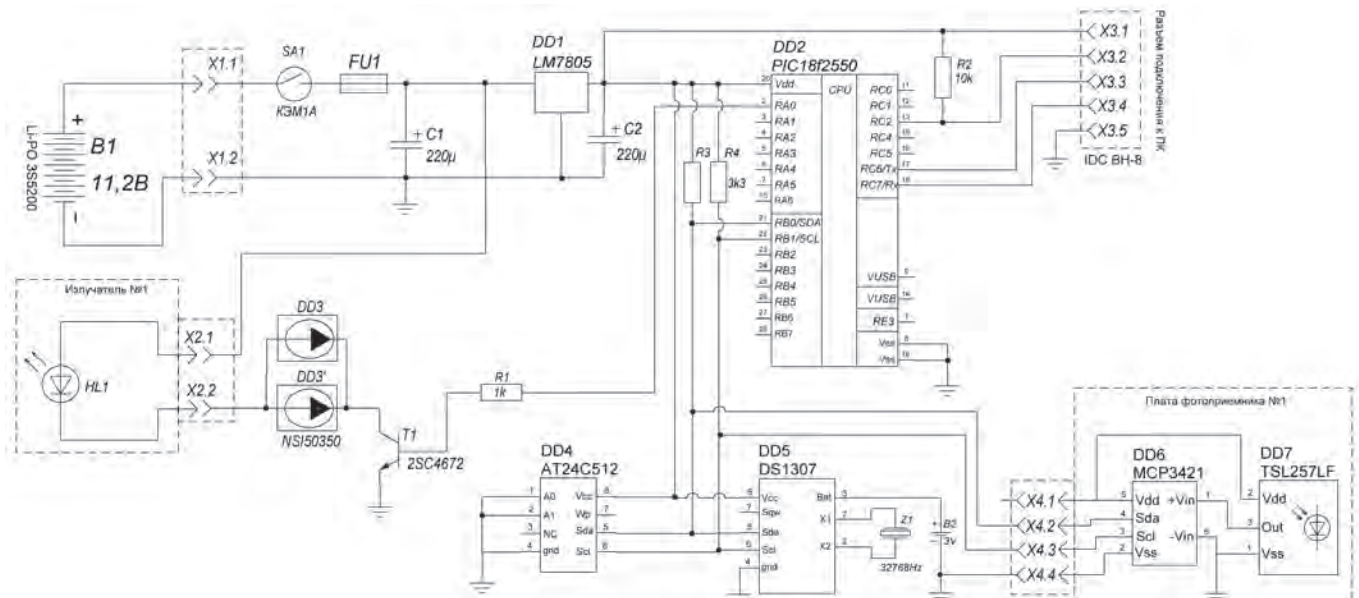


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема устройства

Таблица 1. Сравнение технических характеристик универсального оптического модуля с датчиком для определения концентрации хлорофилла-а (УОМ-1) с техническими характеристиками аналогов

Параметр	УОМ-1	SeaBird Wet-Star-ch1A [20]	Turner Cy-clops-7F [21]	Chelsea UniLux [22]	YSI 6025 [23]	TriOS nanoFlu (microFlu) [24]
Предельная глубина погружения, м	100	600	600	600	60	300
Длина волны возбуждающего излучения, нм	460–470	460	460	470	470	470
Световой поток возбуждающего излучения (в импульсе), Лм	1	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д
Диапазон длин волн регистрируемого излучения, нм	630–1000	650–695	652–740	н/д	650–700	675–695
Разрядность регистрирующего АЦП, бит	18	14	Аналоговый выход 0-5 В	н/д	н/д	н/д
Минимальная регистрируемая концентрация хлорофилла-а, мкг/л	0,1	0,03	0,03	0,01	0,1	0,02
Ориентировочная цена (в стране производителя без учета таможенных сборов), US\$	100	~ 4000	~ 2000	~2000	~1500	~4000

Таблица 2. Характеристики автономной версии оптических модулей, совмещенных с логгером и батареей

Параметр	УОМ-3а	Turner Cy-clops-7F + PME logger [27]	Turner Cy-clops-7F + Triimeter logger [28]	YSI 600OMS V2 [29]	Turner C3 [30]	WetLabs ECO-Triplet [31]
Предельная глубина погружения, м	100	100	200	н/д	600	600
Измеряемые параметры	Хл-а, ОРОВ, мутность, давление	Хл-А, давление	Хл-А, давление, температура	Хл-А	Хл-а, ОРОВ, мутность, давление, температура	Хл-а, ОРОВ, мутность, давление
Тип и емкость встроенного аккумулятора, мАч	Li-ion, 7800	н/д, 3000–8200	н/д, 5500–16000	н/д, 1000–2980	Li-ion, 2200	н/д, 6100
Время автономной работы в режиме регистрации 30 с, ч	240	480	н/д	24	130 / 446	168
Напряжение встроенного аккумулятора, В	7,4	3	4,5	6	14,8	9
Объем встроенной EEPROM памяти, Кбайт	128	н/д	4096	н/д	н/д	н/д
Максимально хранимое количество измерений, шт	87 380	28 800	1 000 000	150 000	15 525 / 53564 (hi-capacity ver.)	67 000
Минимальный интервал между измерениями, с	5	60	н/д	н/д	1	0.25
Ориентировочная цена US\$	500	~ 4000	~ 5000	~ 3000	~ 11000	~ 11000

модуля для определения концентрации хлорофилла-а, а также приведено сравнение с аналогичными датчиками известных производителей. Представленные конфигурации датчиков рассчитаны на подключение к внешним устройствам сбора данных и электропитанию. Цена устройства рассматривается как техническая характеристика, поскольку использование нескольких более дешевых однотипных модулей позволяет создавать распределенные сети измерений при соизмеримом бюджете с одиночными приборами, что позволяет получить альтернативные функциональные возможности разрабатываемых систем.

Как видно из табл. 1, удалось достигнуть существенного уменьшения цены оптического модуля, что достигается за счет использования массово производимых электронных компонентов, предназначенных для использования в бытовых приборах, в то время как в аналогах используются специализированные прецизионные АЦП и фотодиоды с высокой чувствительностью. Следует отметить тот факт, что минимальная обнаружимая концентрация хлорофилла-а данной разработки на порядок меньше, чем у представленных аналогов, что накладывает ограничение на использование многоцелевых оптических модулей в олиготрофных водах.

В табл. 2 приведены характеристики автономных версий оптических модулей, подключенных к индивидуальному даталоггеру (внутреннему или внешнему), имеющих батарею и внутреннюю память. Это позволяет использовать разработанные датчики без организации дополнительной инфраструктуры и согласования коммуникации по сбору данных и электропитанию, быстро разворачивать измерения в неподготовленных районах, применять приборы на стандартных гидрологических зондах и подводных аппаратах.

Также в табл. 2 приведены версии датчиков с тремя оптическими каналами для измерения флуоресценции хлорофилла-а, флуоресценции окрашенных РОВ (ОРОВ) и мутности, с дополнительными датчиками измерения давления и температуры. Это наиболее корректная сборка, позволяющая проводить исправление сигнала флуоресценции хлорофилла-а с учетом вклада широкополосной фоновой флуоресценции РОВ [25, 26], корректировать флуоресцентные измерения на мутность морской воды, учитывать изменения параметров работы диодных источников света от температуры. Для сравнения в данной таблице представлена комплектация оптического модуля

УОМ-3а, содержащая в своем составе: канал регистрации флуоресценции хлорофилла-а, флуоресценции РОВ, мутности и давления заборной воды.

Разработанный модуль прошел предварительные лабораторные испытания по проверке герметичности корпуса и оценке минимально обнаружимой концентрации хлорофилла-а. В ходе лабораторных экспериментов прибор УОМ-1а, погруженный в емкость с морской водой, проработал непрерывно 4 сут в режиме регистрации хлорофилла-а с интервалом 30 с. Минимальная обнаружимая концентрация фитопланктона была определена в лабораторных условиях методом разбавления исходного объема ацетонной вытяжки из фитопланктона дистиллированной водой.

В ходе дальнейших разработок оптический модуль будет снабжен разъемом для подключения к общей подводной информационной сети сбора данных, в которой несколько многоцелевых оптических модулей будут на протяжении длительного времени регистрировать информацию об изменении биооптических параметров и передавать ее на терминал сбора данных, расположенный на берегу.

### ■ Научное применение прибора

Несмотря на то что разработанный модуль обладает меньшей точностью измерений по сравнению с рассмотренными аналогами, он за счет своей стоимости может быть растиражирован и использован для решения таких задач, где требуется одновременное измерение параметров на распределенной территории или на различных глубинных горизонтах. Здесь можно выделить несколько решаемых научных проблем.

Изучение изменчивости гидробиологических и гидрооптических параметров при прохождении таких гидрофизических процессов, как вихри, течения, внутренние волны и апвеллинги. При проведении подобных исследований важными являются одномоментные измерения в различных точках водного пространства, чтобы корректно проследить развитие динамических процессов. Особенно это важно для быстротекающих или протяженных в пространстве процессах. Зачастую применение стандартной схемы измерений на морских судах, когда проводятся последовательные остановки для вертикального профилирования, приводит к тому, что получаемый пространственный разрез «размазываются» во времени и нет возможности правильно восстановить параметры наблюдаемых явлений. Сеть из дешевых датчиков, распределенных в пространстве, позволит

проводить одномоментные измерения и решить данную проблему.

Следующая область применения разработанного оптического модуля – это оперативные подспутниковые наблюдения, где также важно собрать информацию с как можно большего числа точек пространства за минимально возможное время, синхронизированное с пролетом спутника. Использование большого числа датчиков, находящихся в различных типах оптических вод в пределах одного спутникового изображения, позволит корректировать спутниковые данные по цвету моря в оперативном режиме и разрабатывать региональные биооптические алгоритмы, учитывающие сезонные изменения в распределении концентрации оптически-активных компонентов морской воды: клетки фитопланктона, растворенные органические вещества, взвешенные веществ. При этом возможна схема работ, когда для решения приведенных задач хватит одного спутникового изображения, что было бы невозможно при классических схемах измерений на крупных и маломерных судах, автономно-перемещающихся аппаратах.

Также разработанный датчик может быть использован для эффективного контроля распространения и ликвидации антропогенных загрязнений на морской поверхности при любых гидрометеорологических условиях и в любое время суток. Для этого необходимо использовать модификацию модуля, измеряющего флуоресценцию растворенных органических веществ или компонентов нефти. Модули возможно устанавливать в местах загрязнений и вокруг них, чтобы получать оперативную информацию о распространении пятен, и контролировать степень очистки морской воды при применении сорбентов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разрабатываемый модуль может быть использован в распределенных измерениях флуоресценции морской воды в различных точках водного пространства в системах, аналогичных гидрологическим гирияндам, и в качестве плавающих буев. Это даст возможность проводить одномоментные *in-situ* измерения вдоль выделенного разреза или внутри морского полигона, исследовать процессы функционирования фитопланктонных сообществ и воспроизводства растворенных органических веществ на протяженных локациях, изучать влияние гидрофизических процессов на распределение биооптических параметров морской воды, проводить подспутниковые измерения и эффективный экологический мо-

ниторинг. Универсальный оптический модуль может быть также использован в практических студенческих работах и в гражданской науке.

Работа выполнена при финансовой поддержки грантов РФФИ (проект №18-38-00556 мол\_а, разработка при-

бора). Программы РАН (проект № 18-1-004) и государственной темы № АААА-А17-117030110037-8 – исследование возможности использования универсальных оптических модулей на гидрологических гирляндах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Leontyev A.P., Yaroshchuk I.O., Kosheleva A.V., Pivovarov A.A., Samchenko A.N., Shvyrev A.N., Smirnov S.V. Aspatially distributed measuring complex for monitoring hydrophysical processes on the ocean shelf // *Instruments and Experimental Techniques*. 2017. Vol. 60, No. 1. P. 130–136.
2. Roemmich D., Johnson G., Riser S., Davis R., Gilson J., Owens W.B., Garzoli S.L., Schmid C., Ignaszewski M. The Argo Program: Observing the Global Ocean with Profiling Floats // *Oceanography*. 2009. Vol. 22, No. 2. P. 34–43.
3. Laun L.A., Pittman E.E. Development of a Small, Low-Cost, Networked Buoy for Persistent Ocean Monitoring and Data Acquisition // *OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston*. doi: 10.1109/oceans.2018.8604510.
4. Колюхов И.В., Селина М.С., Морозова Т.В., Погосян С.И. Опыт непрерывного флуориметрического мониторинга фитопланктона на буйковой станции // *Океанология*. 2012. Vol. 52, No. 1. С. 139–149.
5. Xing X., Morel A., Claustre H., Antoine D., D’Ortenzio F., Poteau A., Mignot A., Lee Z., Shang S. Combined processing and mutual interpretation of radiometry and fluorimetry from autonomous profiling Bio Argo floats: Chlorophyll A retrieval // *J. Geophys. Res.* 2011. Vol. 116, No. C6. P. 6–20. doi.org/10.1029/2010JC006899.
6. Бауло Е.Н., Букин И.О., Дорошенков И.М., Майор А.Ю., Салук П.А. Телеуправляемый подводный комплекс для исследования биооптических параметров морской воды // *Оптика атмосферы и океана*. 2014. Т. 27, № 3. С. 262–265.
7. Островский А.Г., Зацепин А.Г., Соловьев В.А., Цибульский А.Л., Швоев Д.А. Автономный мобильный аппаратно-программный комплекс вертикального зондирования морской среды на закоренной буйковой станции // *Океанология*. 2013. Т. 53, № 2. С. 259–268.
8. Ярошук И.О., Леонтьев А.П., Кошелева А.В., Самченко А.Н., Пивоваров А.А., Храпченков Ф.Ф., Швырев А.Н., Ярошук Е.И. Экспериментальные исследования внутренних волн в прибрежной зоне Японского моря // *Подводные исследования и робототехника*. 2013. Т. 15, № 1. С. 37–44.
9. Навроцкий В.В., Павлова Е.П., Ляпидевский В.Ю. Внутренние волны и их биологические эффекты в шельфовой зоне моря // *Вестн. ДВО РАН*. 2012. Т. 166, № 6. С. 22–31.
10. Кукарин В.Ф., Ляпидевский В.Ю., Храпченков Ф.Ф., Ярошук И.О. Нелинейные внутренние волны в шельфовой зоне моря // *Изв. РАН. МЖГ*. 2019. № 3. С. 38–47. doi: 10.1134/S0568528119030083.
11. Moe A.E., Marx S., Banani N., Liu M., Marquardt B., Wilson D.M. Improvements in LED-based fluorescence analysis systems // *Sensors and Actuators B*. 2005. Vol. 111/112. P. 230–241. doi: 10.1016/j.snb.2005.01.057.
12. Dickens J.E., Vaughna M.S., Taylor M., Pongstingl M. An LED array-based light induced fluorescence sensor for real-time process and field monitoring // *Sensors and Actuators B*. 2011. Vol. 158, No. 1. P. 35–42. doi: 10.1016/j.snb.2011.04.077.
13. Глуховец Д.И., Гольдин Ю.А., Гуреев Б.А., Венцукт Ю.И. Светодиодный флуориметр со спектральной регистрацией // *Труды I Междунар. конф. «Современные проблемы термогидромеханики океана»*. 2017. С. 42–45. doi: 10.29006/978-5-9901449-3-4-2017-1-42-45.
14. Lamb J.J., Eaton-Rye J.J., Hohmann-Marriott M.F. An LED-based fluorometer for chlorophyll quantification in the laboratory and in the field // *Photosynth. Res.* 2012. Vol. 114, No. 1. P. 59–68. doi: 10.1007/s11120-012-9777-y.
15. Leeuw T., Boss E., Wright D. In situ Measurements of Phytoplankton Fluorescence Using Low Cost Electronics // *Sensors*. 2013. Vol. 13, No. 6. P. 7872–7883. doi: 10.3390/s130607872.
16. Hu Y., Pan Y., Sun L., Chen H., Jiang K., Pan J., Ye S. An In-Situ Highly Sensitive and Reliable Chlorophyll Sensor Based on Pseudo-Random Sequence Modulation // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2013. Vol. 62, No. 8. P. 2314–2322. doi: 10.1109/TIM.2013.2256766.
17. Kissinger J., Wilson D. Portable Fluorescence Lifetime Detection for Chlorophyll Analysis in Marine Environments // *IEEE Sens. J.* 2011. Vol. 11, No. 2. P. 288–295. doi: 10.1109/JSEN.2010.2054078.
18. Truter H. Supervised Using low cost components to determine chlorophyll concentration by measuring fluorescence intensity // *Diss. Master Of Science*. 2015. Cape Town.
19. Saluk P.A., Doroshenko I.M., Bukin O.A., Sokolova E.B., Baulo E.N. Change of seawater fluorescence properties when mixing with crude oil // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2014. Vol. 27, No. 5. P. 438–443. doi: 10.1134/s102485601405011x.
20. Optical Sensors: Fluorometers WETStar Fluorometer. – URL: <https://www.seabird.com/fluorometers/wetstarfluorometer/family?productId=54627869908> (дата обращения: 11.08.2019).
21. Cyclops-7F Submersible Sensors. – URL: <https://www.turnerdesigns.com/cyclops-7f-submersible-fluorometer> (дата обращения: 11.08.2019).
22. UniLux Algae Sensor (Chlorophyll, Phycoerythrin Cyanobacteria, Phycocyanin Cyanobacteria & Turbidity). – URL: <https://www.chelsea.co.uk/products/marine-science/fluorometers/unilux-fluorometer> (дата обращения: 11.08.2019).
23. 6025 Chlorophyll Sensor. – URL: <https://www.yei.com/Accessory/id-6025/6025-Chlorophyll-Sensor> (дата обращения: 11.08.2019).
24. TriOS optical sensors. NanoFlu. – URL: <https://www.trios.de/en/nanoflu.html> (дата обращения: 11.08.2019).
25. Zakharkov S.P., Shtraikhert E.A., Shambarova Y.V., Gordeichuk T.N., Shi X. Measuring chlorophyll a concentrations in the sea of Japan using probe and flow fluorimeters // *Oceanology*. 2016. Vol. 56, No. 3. P. 444–451. doi: 10.7868/S0030157416020210.
26. Bukin O.A., Golik S.S., Salyuk P.A., Lastovskaya I.A., Baulo E.N. Change in laser-induced fluorescence spectra of sea water during degradation of dissolved organic matter // *J. of Applied Spectroscopy*. 2007. Vol. 74, No. 1. P. 115–119. doi: 10.1007/s10812-007-0018-7.
27. Cyclops-7 Logger Submersible water logger for a variety of measurements. – URL: <https://www.pme.com/products/cyclops-7-logger> (дата обращения: 11.08.2019).
28. Manta. Multiprobes. – URL: <https://www.waterprobes.com/multiprobes-and-sondes-for-monitori> (дата обращения: 11.08.2019).
29. 6000MS V2 Optical Monitoring Sonde. – URL: <https://www.yei.com/6000MS-V2> (дата обращения: 11.08.2019).
30. C3 Submersible Fluorometer. – URL: <https://www.turnerdesigns.com/c3-submersible-fluorometer> (дата обращения: 11.08.2019). Optical Sensors: Combination Sensors ECO Triplet-w. – URL: <https://www.seabird.com/combination-sensors/eco-triplet-w/family?productId=54627869918> (дата обращения: 11.08.2019).
31. Optical Sensors: Combination Sensors ECO Triplet-w. – URL: <https://www.seabird.com/combination-sensors/eco-triplet-w/family?productId=54627869918> (дата обращения: 11.08.2019).