

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 621.383

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ВОДЫ С ПОГРУЖАЕМЫМ МОДУЛЕМ

© 2012 г. Е. Л. Гамаюнов, С. С. Вознесенский, А. А. Коротенко, А. Ю. Попик

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН

Россия, 690041, Владивосток, ул. Радио, 5

Поступила в редакцию 14.07.2011 г.

Система мониторинга воды с погружаемым модулем предназначена для выполнения непрерывных измерений концентрации хлорофилла “А” и растворенных органических веществ на различных глубинах методом лазерно-индуцированной флуоресценции. Особенностью системы является использование в погружаемом модуле оптоволоконного датчика флуоресценции, который позволяет выполнять измерения в широком диапазоне длин волн. В статье приведены описание основных узлов системы и алгоритм ее функционирования. Изложена методика обработки сигнала флуоресценции. Результаты измерений, выполненные с использованием системы мониторинга, сравниваются с результатами, полученными с помощью узкополосных флуорометрических датчиков WETLabs (США).

ВВЕДЕНИЕ

Жизнь на Земле в значительной степени зависит от состояния мирового океана. Благополучие больших и малых водоемов определяется в первую очередь “здоровьем” присутствующих в воде разнообразных одноклеточных фотосинтезирующих микроводорослей, получивших общее название фитопланктон, который является основным источником кислорода и первичным звеном в пищевой цепочке океана. Состояние фитопланктона зависит от изменений таких параметров среды обитания, как температура, освещенность, состав и концентрация растворенных в воде неорганических и органических веществ. Техногенные катастрофы и природные катаклизмы серьезно сказываются на состоянии клеток фитопланктона и протекающих в них физиологических процессах. В результате это приводит к изменению местоположения и эффективности воспроизводства морских биоресурсов, являющихся объектами промысла человека.

Оперативно определять наличие и концентрацию фитопланктона в воде позволяют методы спутникового зондирования поверхности океана, основанные на измерениях оптических спектров отраженного солнечного света от воды. Погрешность таких измерений мала для чистых океанических вод и становится недопустимо большой для прибрежных вод, в которых присутствуют выносы ила и растворенных органических веществ (р.о.в.) с водами рек. Особенно актуальной является проблема измерения концентрации фитопланктона на разных глубинах и в широком диапазоне концентраций органических и неорганических веществ разного состава естественного и техногенного происхождения.

Средства измерения концентрации фитопланктона, как правило, основаны на использовании явления флуоресценции, поскольку молекулы хлорофилла, входящие в состав живой клетки микроводорослей, флуоресцируют на характерной длине волны света в диапазоне 680–690 нм. Имеющиеся на рынке приборы для измерения концентрации хлорофилла “А” позволяют выполнять измерения в широком диапазоне глубин (от единиц до нескольких тысяч метров). Считается, что концентрация фитопланктона пропорциональна концентрации хлорофилла “А”. При этом не учитывается видовой состав и биологическое состояние клеток микроводорослей, флуоресценция р.о.в. и присутствие в воде взвешенных частиц, которые рассеивают и поглощают световую энергию. В результате измерение концентрации хлорофилла указанными приборами выполняется с большой погрешностью.

Проведенные ранее исследования [1] показали, что существенно уменьшить погрешность измерения концентрации хлорофилла можно, оценив вклад флуоресценции р.о.в. в диапазоне 680–690 нм. Для этого необходимо исследовать флуоресцентный отклик среды в широком диапазоне длин волн, от 550 до 750 нм [2, 3]. Однако создание малогабаритных погружаемых измерителей на основе широкополосных спектрометров является сложной технической задачей. Необходимость защиты прецизионного оптического оборудования от повреждений, обеспечение его электроэнергией, средствами связи, а также спуска и подъема существенно увеличивают стоимость и повышают требования к надежности измерительных систем такого типа. В работах [4–7] было показано, что многие недостатки погружаемых широкополосных измерительных систем,

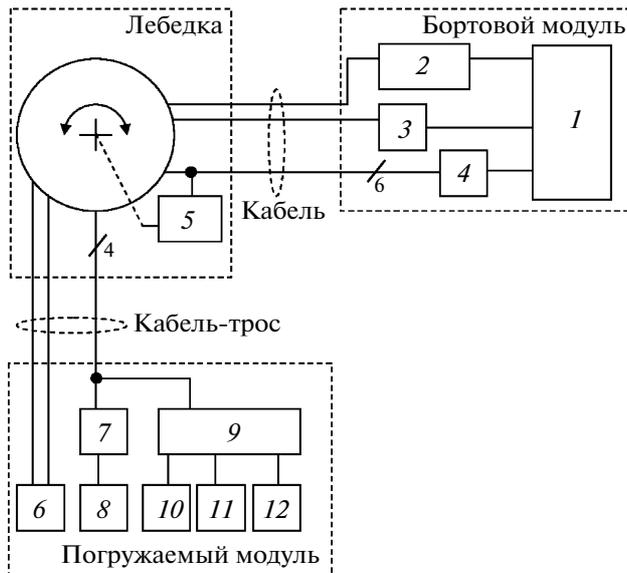


Рис. 1. Структурная схема системы мониторинга. 1 – персональный компьютер, 2 – спектрометр, 3 – лазер, 4 – электронный блок, 5 – контроллер электродвигателя лебедки, 6 – волоконно-оптический датчик флуоресценции, 7 – модуль управления насосом, 8 – прокачивающий насос, 9 – модуль сбора информации, 10 – датчик давления, 11 – датчик температуры, 12 – датчик герметичности погружаемого модуля.

основанных на принципе флуоресценции, могут быть устранены или уменьшены, если использовать новые оптоволоконные датчики, которые не требуют питания и дополнительных средств связи.

Опыт разработки и эксплуатации экспериментального образца оптоволоконного флуориметра с погружаемым модулем [4] показал перспективность использования систем с внешним оптоволоконным датчиком для выполнения оперативных флуорометрических исследований акваторий с маломерных судов.

Цель настоящих исследований – разработка системы мониторинга прибрежных морских акваторий, основанной на использовании оптоволоконного датчика, установленного в погружаемом модуле. Система предназначена для проведения как непрерывных, так и периодических измерений концентрации хлорофилла “А” и р.о.в. методом индуцированной флуоресценции на разных глубинах в режиме реального времени.

ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ

Система мониторинга, структурная схема которой изображена на рис. 1, разделена на две части: бортовую и погружаемую. Бортовая часть состоит из бортового модуля и лебедки, соединенных бортовым кабелем. Бортовой модуль размещается в каюте исследовательского судна. Лебедка уста-

навливается вплотную к борту судна. Бортовой кабель обеспечивает передачу оптических сигналов, подачу питания на лебедку и связь по интерфейсу RS-485. Погружаемая часть включает в себя погружаемый модуль и кабель-трос. Внутри бортового кабеля и кабель-троса находятся оптические волокна и электрические провода. Кварцевые оптические волокна обеспечивают передачу импульсного лазерного излучения в погружаемый модуль в область возбуждения флуоресценции и флуоресцентного свечения, зарегистрированного датчиком флуоресценции, в расположенный на борту спектрометр. Погружаемая часть выполнена в виде прочного цилиндрического корпуса с размещенными внутри датчиками и устройством для сбора и передачи данных в бортовой модуль. Информационная связь между частями системы осуществляется по интерфейсу RS-485, позволяющему организовать шинную структуру измерительной системы.

Бортовой модуль содержит источник излучения, приемник излучения и электронный блок. В качестве источника излучения используется YAG:Nd-лазер Ultra CFR компании Big Sky Laser Technologies (США). Лазер излучает свет на длине волны 532 нм, частота импульсов 20 Гц, длительность импульса 6 нс. Энергия лазерного импульса составляет 2 мДж. Лазер подключен к компьютеру через интерфейс RS-232.

Приемником оптического излучения служит широкополосный спектрометр [5], в состав которого входят усилитель яркости марки ЭПМ-47Г (коэффициент усиления $2 \cdot 10^4$) и п.з.с.-камера PixelFly немецкой фирмы PCO AG GmbH с разрешением п.з.с.-матрицы 640×480 пикселей. Сбор данных осуществляется в режиме накопления, продолжительность которого регулируется от 1 до 10 с. Для устранения засветки усилителя яркости и п.з.с.-матрицы лазерным излучением, проникающим через приемный канал датчика флуоресценции, на входе спектрометра установлен светофильтр с полосой пропускания 540–2700 нм. Эффективный спектральный диапазон измерений спектрометра составляет 540–770 нм, спектральное разрешение – 5 нм. Спектрометр подключен к персональному компьютеру с помощью специальной интерфейсной PCI-платы.

Электронный блок бортового модуля содержит преобразователь интерфейса RS-485 для организации многоканальной связи с погружаемым модулем и лебедкой, а также блоки питания с напряжением: 24 В – для питания двигателя лебедки и 12 В – для остальных электронных модулей.

Лебедка предназначена для спуска погружаемого модуля на заданную глубину и содержит барабан, на который намотан кабель-трос, слип, электропривод и контроллер управления. Правильность намотки кабель-троса на барабан обеспечивается тросоукладчиком, а сход кабеля с бара-

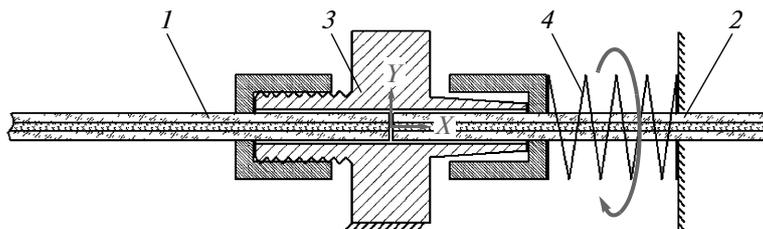


Рис. 2. Конструкция вращающегося оптоволоконного сочленения. 1 – неподвижное о.в., 2 – вращаемое о.в., 3 – неподвижный соединитель о.в., 4 – пружина.

бана (с достаточным выносом за борт) – с помощью специальной изогнутой пластины – слипа. Слип обеспечивает допустимый радиус изгиба кабель-троса при спуске и подъеме погружаемого модуля. Сигналы интерфейса RS-485 и электрическое питание с бортового модуля передаются на вращающийся вместе с барабаном кабель-трос через скользящие контакты токосъемника. Передача оптических сигналов осуществляется через вращающиеся оптоволоконные сочленения, установленные в торцах осей с двух сторон барабана лебедки. Эскиз конструкции вращающегося оптоволоконного сочленения приведен на рис. 2.

Барабан лебедки приводится в движение коллекторным электродвигателем, управление которым осуществляется компьютером по интерфейсу RS-485 через контроллер электродвигателя. При необходимости лебедка может быть переведена в режим ручного управления.

Барабан лебедки имеет люк со съемной крышкой, через который выполняется монтаж кабель-троса и размещение оптических волокон. Габариты лебедки с установленным погружаемым модулем составляют $1.6 \times 1.2 \times 1.3$ м. Внутри барабана оптическое волокно (о.в.) сформировано в виде конусной спирали. Шаг спирали был определен при проектировании барабана лебедки и принят равным допустимому радиусу изгиба применяемых волокон ($R \geq 300$ мм).

Радиус изгиба о.в. выбирали, исходя из результатов анализа потерь флуоресцентного излучения в зависимости от радиуса изгиба и длины волокна. Для оценки этих потерь необходимо рассмотреть процесс распространения флуоресцентного излучения по о.в., намотанному на барабан лебедки. При анализе потерь в изогнутом о.в. был использован асимптотический подход, кратко изложенный в [8]. Флуоресцирующий объем воды представляет собой диффузный источник световой энергии, который в приемном многомодовом о.в. возбуждает все возможные для данного о.в. моды. Часть возбужденных мод переходит в оболочку о.в. и теряется, остальные – так называемые направляемые моды – распространяются по сердцевине на большое расстояние. При большом количестве мод распределение энергии между мо-

дами можно считать равномерным. В этом случае потери мощности могут быть определены как сумма потерь для каждой направляемой моды.

Полное число мод M_{tot} , которые могут быть возбуждены в волноводе, и число направляемых мод M_{bm} в прямом о.в. со ступенчатым профилем показателя преломления для диффузного источника могут быть вычислены с помощью следующих выражений:

$$M_{tot} = \frac{V^2}{4\Delta}, \quad M_{bm} = \frac{V^2}{2}. \quad (1)$$

Здесь $V = k\rho\sqrt{(n_{co}^2 - n_{cl}^2)}$ – волноводный параметр (нормированная частота) о.в., где $k = 2\pi/\lambda$ – коэффициент распространения, λ – длина волны света в свободном пространстве, ρ – радиус сердцевины, n_{co} – показатель преломления сердцевины, n_{cl} – показатель преломления оболочки; $\Delta = (n_{co} - n_{cl})/n_{co} \approx \theta_c^2/2$ – параметр высоты профиля показателя преломления, где θ_c – критический угол распространения.

В изогнутом волоконном световоде нарушаются условия полного внутреннего отражения, в результате чего все распространяющиеся лучи становятся вытекающими и излучают мощность за счет туннелирования или рефракции [8]. Это, в свою очередь, приводит к существенному увеличению потерь по сравнению с прямым о.в.

В работе [3] показано, что для многомодового волокна, изогнутого с радиусом R , коэффициент затухания моды α может быть вычислен по формуле

$$\alpha(\theta) = 2n_{co}k(\theta_c^2 - \theta^2) \times \exp\left[-\frac{2}{3}n_{co}kR\left(\theta_c^2 - \theta^2 - \frac{2\pi}{R}\right)^{3/2}\right], \quad (2)$$

где θ – угол моды.

На рис. 3 приведен график зависимости $\alpha(\theta)$ для используемого в спектрометре о.в. при разных значениях радиуса изгиба R . Из графика видно, что изгиб о.в. функционально играет роль заграждающего фильтра, который отсекает моды высокого порядка. Чем меньше радиус изгиба о.в., тем большее количество мод будет задержано

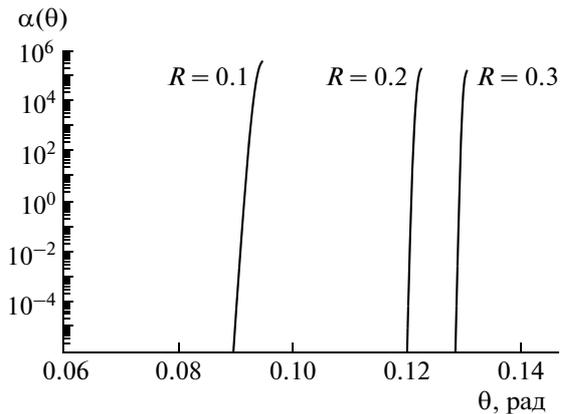


Рис. 3. Зависимость коэффициента затухания от угла моды при разных значениях (в метрах) радиуса изгиба о.в. ($n_{co} = 1.516$, $n_{cl} = 1.5$, $\lambda = 685$ нм).

таким фильтром и, следовательно, тем больше будут потери энергии.

Отношение числа мод, не прошедших через изгиб о.в., к общему их количеству может быть вычислено как [3]

$$y_f = \rho / (R\Delta). \quad (3)$$

Полагая, что мощность излучения равномерно распределена по модам, формулу (3) можно использовать для приближенной оценки потерь в изгибе для многомодового о.в. при диффузном возбуждении. Суммарная мощность направляемых мод в зависимости от радиуса изгиба, вычисленная с использованием формулы (3), показана на рис. 4.

Анализ приведенных графиков позволяет сделать вывод, что потери мощности в изгибе определяются величиной радиуса изгиба о.в. и мало зависят от длины о.в. При радиусе изгиба 0.3 м потери составляют 10%. Именно эта величина радиуса была принята при проектировании лебедки, что и обусловило размеры ее конструктивных элементов: диаметра барабана, радиусов изгиба металлических защитных трубок, внутри которых уложены отрезки оптических волокон, форму и размеры слипа.

Бортовой соединительный кабель содержит оптические волокна, передающие излучение, и электрические провода для питания и связи по интерфейсу RS-485. Бортовой кабель помещен в защитную оболочку. Электрические провода и оптические волокна имеют разъемы, которые позволяют быстро выполнять сборочные работы при установке системы на судно. Длина бортового кабеля составляет 30 м, что достаточно для размещения бортового модуля в каюте судна-носителя, даже при значительном удалении от лебедки.

Кабель-трос, соединяющий погружаемый модуль с лебедкой, выполняет функцию несущего силового элемента и защищает оптические во-

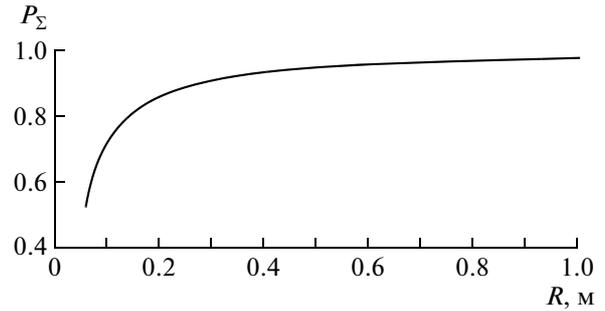


Рис. 4. Зависимость суммарной мощности направляемых мод в о.в. от радиуса изгиба.

локна и электрические провода от внешнего механического воздействия. Кварцевые оптические волокна обеспечивают передачу импульсного лазерного излучения в погружаемый модуль в область возбуждения флуоресценции и флуоресцентного свечения из датчика флуоресценции в спектрометр. Несущий силовой элемент кабель-троса – оболочка из прочного арамидного волокна. Соединение кабель-троса с погружаемым модулем осуществляется через герметичный фланец. Конструкция кабель-троса приведена на рис. 5.

Погружаемый модуль (рис. 6) имеет цилиндрическую конструкцию, на которой закреплены фланец 1 с кабель-тросом, светозащитный лабиринт 9, малогабаритный насос 11. Внутри герметичного корпуса погружаемого модуля расположены оптоволоконные датчики флуоресценции 8, датчики глубины 3 и температуры 2, блок управления насосом 4 и плата сбора данных 5, а также датчик герметичности погружаемого модуля (на рисунке не показан). Оптоволоконный датчик флуоресценции 8 рабочей частью выходит за пределы корпуса в прокачиваемый объем, защищенный лабиринтом 9.

Датчики температуры, давления и натекания подключены к модулю сбора данных 5, в качестве которого применена плата МВА8 (ООО “Производственное объединение ОВЕН”). Плата МВА8 представляет собой 8-канальное 12-битное а.ц.п. с возможностью передачи по каналу RS-485 данных о глубине, температуре воды и герметичности погружаемого модуля в бортовую часть системы. Блок управления насосом 4 выполнен на микропроцессоре PIC16F628. Этот блок принимает управляющие команды от персонального компьютера по интерфейсу RS-485 и включает/выключает насос 11. Датчиком глубины 3 служит преобразователь давления ОТ-1 (WIKА GmbH). В качестве датчика температуры 2 используется термосопротивление ТС204-50МСu, температурный диапазон измерений которого составляет от -190 до $+200^\circ\text{C}$, разрешающая способность – 0.01°C и погрешность $\pm 0.25\%$. Датчик герметичности выполнен в виде концентрических металлических

полос, размещенных на диэлектрическом основании.

Светозащитный лабиринт 9 обеспечивает защиту области возбуждения флуоресценции от рассеянного в воде солнечного света. Его конструкция позволяет выполнять измерения не только на глубине, но и в приповерхностных водах при ярком солнце. Вода прокачивается через лабиринт при помощи насоса.

Оптоволоконный датчик флуоресценции 8 аналогичен датчику более ранней разработки измерителя флуоресценции [7] и представляет собой два оптических волокна, установленных в цилиндрическую оправку.

Длина погружаемого модуля 450 мм, диаметр 190 мм, масса модуля 8 кг.

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ

Система мониторинга управляется из общего окна пользовательского интерфейса, разработанного в среде графического программирования LabVIEW Professional Development System 8.6 компании National Instruments (США). Общий вид интерфейса приведен на рис. 7.

Программное обеспечение объединяет элементы системы, подключенные к персональному компьютеру через разные интерфейсы связи. Пользовательский интерфейс позволяет задавать параметры работы устройств и выполнять измерения, визуализацию и сохранение данных как в ручном, так и в автоматическом режимах.

В автоматическом режиме работа системы осуществляется по заранее заданному алгоритму. Перед началом работы задаются параметры погружения модуля (шаг погружения, предельная глубина, скорость спуска). Результаты измерения визуализируются в режиме реального времени.

Спуск и подъем погружаемого модуля осуществляется лебедкой, которая через электронный блок 4 и контроллер 5 управляется компьютером 1 (см. рис. 1). Глубина погружения контролируется датчиком давления 10. Датчики давления 10, температуры 11 и герметичности погружаемого модуля 12 опрашиваются модулем сбора данных 9. При достижении заданной глубины электродвигатель лебедки останавливается, и выполняется цикл измерений. На заданной глубине насос 8 прокачивает воду через датчик флуоресценции 6. В бортовом модуле включается лазер 2, излучение которого через о.в. передается в оптоволоконный датчик 6. Флуоресцентное излучение воды по второму о.в. поступает в спектрометр 3. Затем происходит спуск погружаемого модуля на следующую глубину, и цикл измерений повторяется.

Для каждой точки измерения сохраняются спектр флуоресценции воды и данные о глубине погружения модуля и температуре воды. По спек-

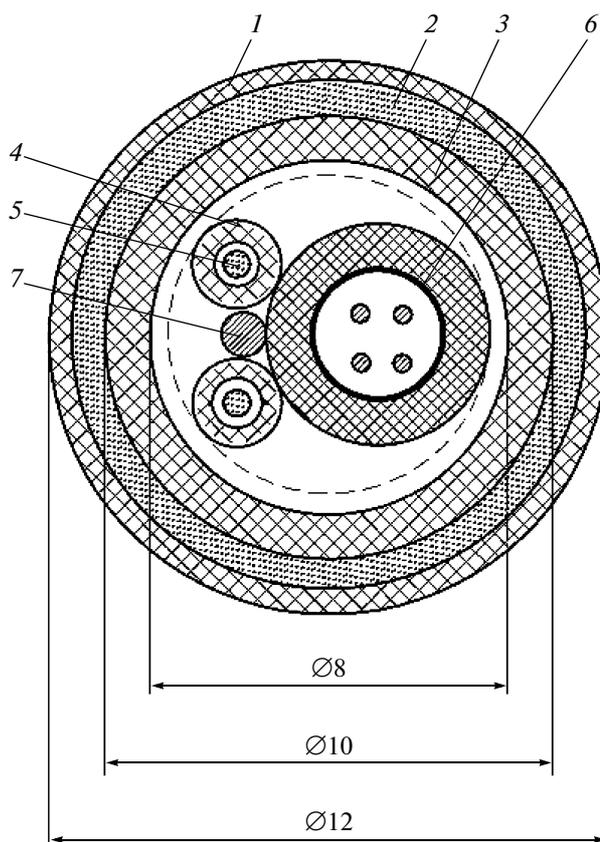


Рис. 5. Конструкция кабель-троса. 1 – внешняя полимерная оболочка; 2 – несущая оболочка-чулок из арамидного волокна; 3 – полиуретановая трубка высокого давления; 4 – защитная оболочка оптоволоконна; 5 – оптическое волокно; 6 – многожильный электрический кабель; 7 – стальной трос.

тру флуоресценции вычисляется концентрация хлорофилла “А” и концентрация р.о.в. По результатам измерений в каждом цикле строятся графики изменения концентрации веществ и температуры по глубине. На рис. 7 (справа) показан график, на котором в реальном времени отображаются кривые температуры, концентрации хлорофилла “А” и р.о.в. Для обеспечения возможности дальнейшей обработки с помощью различных математических пакетов накопленные данные сохраняются в файле с кодировкой ASCII.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Сведения о флуоресцентном свечении воды поступают в спектрометр, где на п.з.с.-матрице формируется двумерный массив чисел, который передается в персональный компьютер. Каждый столбец массива соответствует определенной длине волны, а числа в столбце – яркости засветки пикселей п.з.с.-матрицы. Для уменьшения помех, вызванных шумами в усилителе яркости и п.з.с.-матрице, полученный массив чисел обраба-

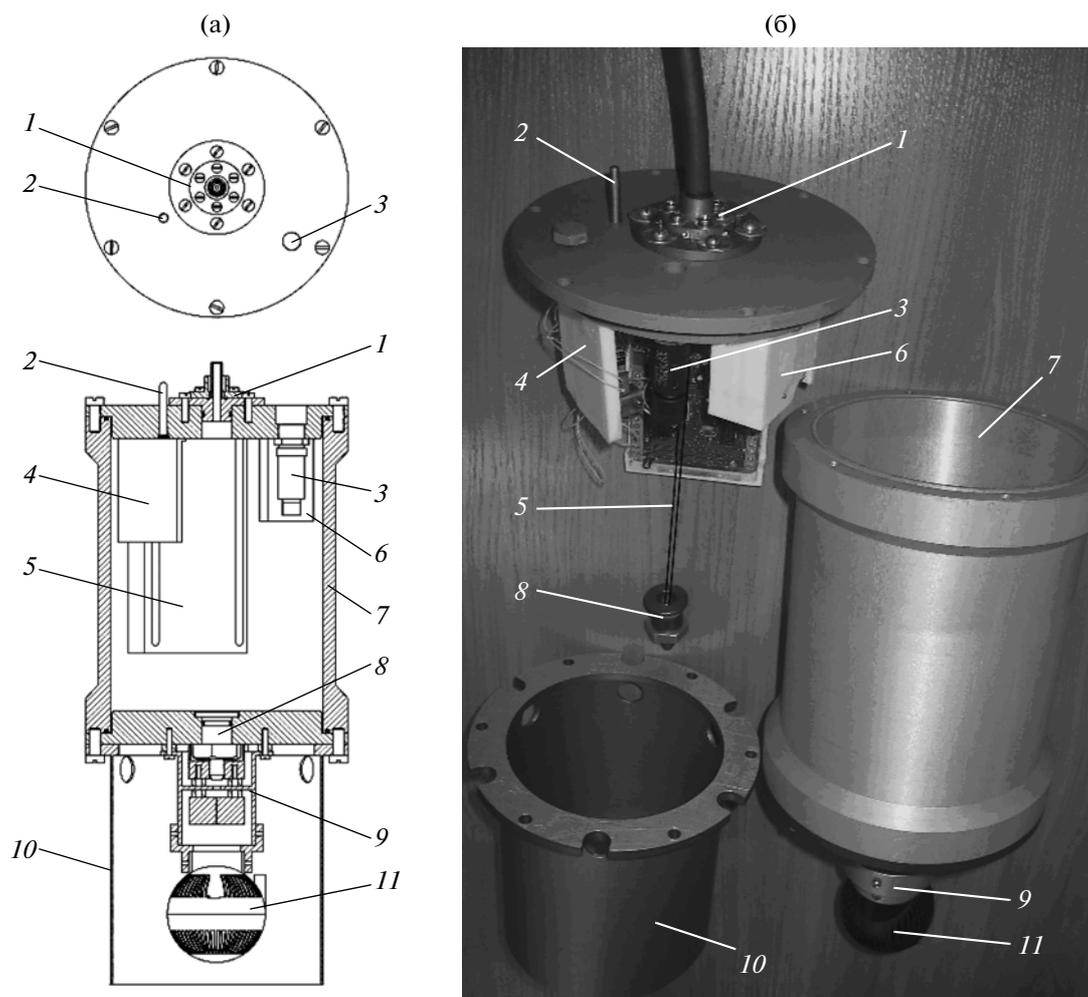


Рис. 6. Конструкция (а) и внешний вид (б) погружаемого модуля. 1 – герметичный фланец, 2 – датчик температуры, 3 – датчик глубины, 4 – блок управления насосом, 5 – модуль сбора данных, 6 – преобразователь напряжения, 7 – корпус, 8 – датчик флуоресценции, 9 – светозащитный лабиринт, 10 – кожух защитный, 11 – насос.

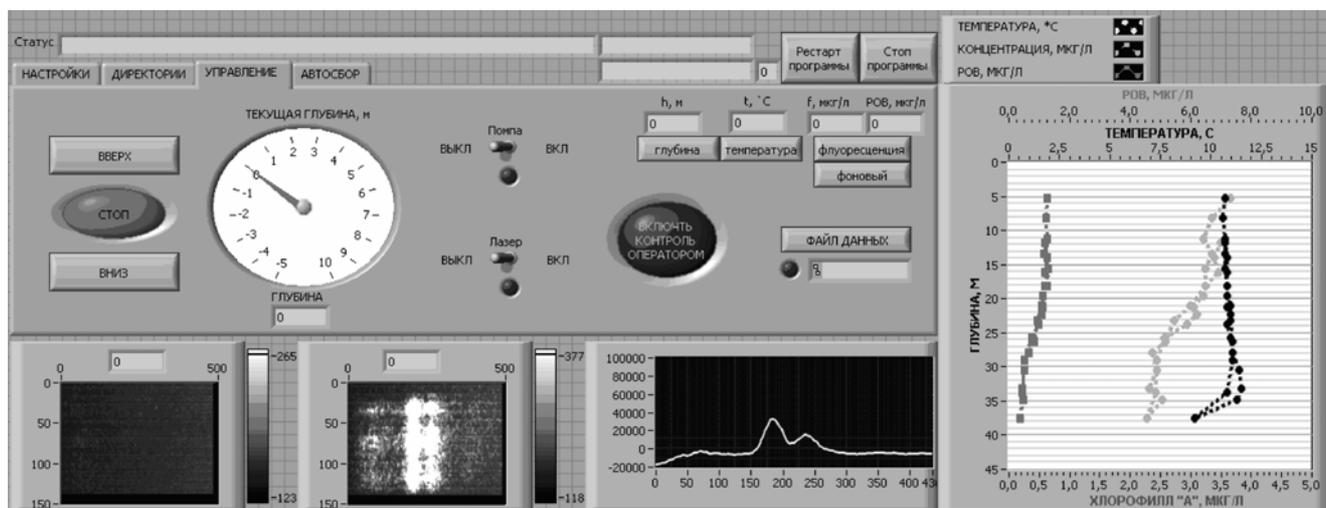


Рис. 7. Интерфейс управления.

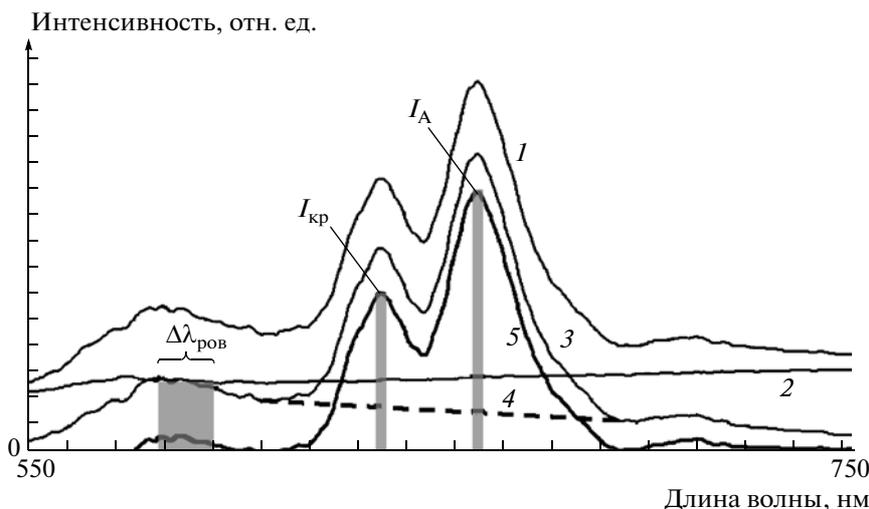


Рис. 8. Обработка спектральных данных. 1 – исходный спектр флуоресценции воды; 2 – кривая темнового тока п.з.с.-матрицы; 3 – уточненный спектр флуоресценции воды; 4 – аппроксимация спектра флуоресценции р.о.в.; 5 – спектральная кривая для расчета значений $I_{кр}$ и I_A , где $I_{кр}$ – максимум комбинационного рассеяния воды, I_A – максимум интенсивности флуоресценции хлорофилла “А”; $\Delta\lambda_{ров}$ – диапазон длин волн для оценки содержания р.о.в.

тывается медианным фильтром 3×3 . После суммирования чисел в столбцах формируется одномерный массив яркостей (рис. 8, кривая 1). Огибающая спектра флуоресценции воды (кривая 3) получается вычитанием из кривой 1 кривой темнового тока п.з.с.-матрицы 2, измеренной ранее.

Для вычисления вклада р.о.в. в сигнал флуоресценции хлорофилла “А” на длине волны 685 нм и комбинационного рассеяния (к.р.) воды на длине волны 650 нм огибающая спектра флуоресценции р.о.в. в диапазоне длин волн 580–750 нм аппроксимируется экспоненциальной функцией, как это было предложено в [9]:

$$I_{ров}(\lambda) = a_{ров} \exp(-b_{ров}\lambda), \quad (4)$$

где $a_{ров}$ и $b_{ров}$ – параметры аппроксимации, которые определяются методом наименьших квадратов. При вычитании из кривой 3 кривой 4, полученной аппроксимацией, получают спектральную кривую 5, из которой определяют величину I_A – интенсивность флуоресценции на длине волны свечения хлорофилла “А” и величину $I_{кр}$ – интенсивность к.р. воды.

При расчете концентрации хлорофилла “А” использовался метод внутреннего репера комбинационного рассеяния [9, 10]. Метод состоит в нормировании интенсивности флуоресценции вещества по максимуму интенсивности к.р. воды и применим в тех случаях, когда длины волн флуоресценции исследуемого вещества и к.р. воды достаточно близки и, следовательно, можно пренебречь различием оптических свойств воды на этих длинах волн. Концентрация хлорофилла “А” рассчитывалась по формуле, взятой из работы [9]:

$$C = k_A \frac{I_A}{I_{кр}}, \quad (5)$$

где k_A , мкг/л – коэффициент, связывающий интенсивность флуоресценции хлорофилла “А” с его концентрацией.

Расчет концентрации р.о.в. выполнялся аналогично:

$$C = k_{ров} \frac{I_{ров}}{I_{кр}}, \quad (6)$$

где $I_{ров}$ – интегральная интенсивность флуоресценции р.о.в. в области $\Delta\lambda_{ров}$; $k_{ров}$, мкг/л – коэффициент, связывающий интенсивность флуоресценции р.о.в. с его концентрацией.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕДИЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Разработанная система мониторинга была испытана в экспедициях по акваториям залива Петра Великого – в Амурском и Уссурийском заливах. Были выполнены *in situ* исследования вертикальных распределений концентрации хлорофилла “А” и р.о.в. Калибровка системы мониторинга проводилась по данным, полученным с помощью узкополосных флуорометрических датчиков WET-Labs (США), установленных на погружаемом зонде SBE19Plus фирмы SeaBird (США). Измерения выполнялись при одновременном погружении в воду зонда SBE19Plus и погружаемого модуля разработанной системы мониторинга.

Результаты совместных измерений приведены на рис. 9. В чистых водах наблюдалось хорошее совпадение результатов измерения концентрации р.о.в. и хлорофилла “А” (рис. 9а–9д), разница

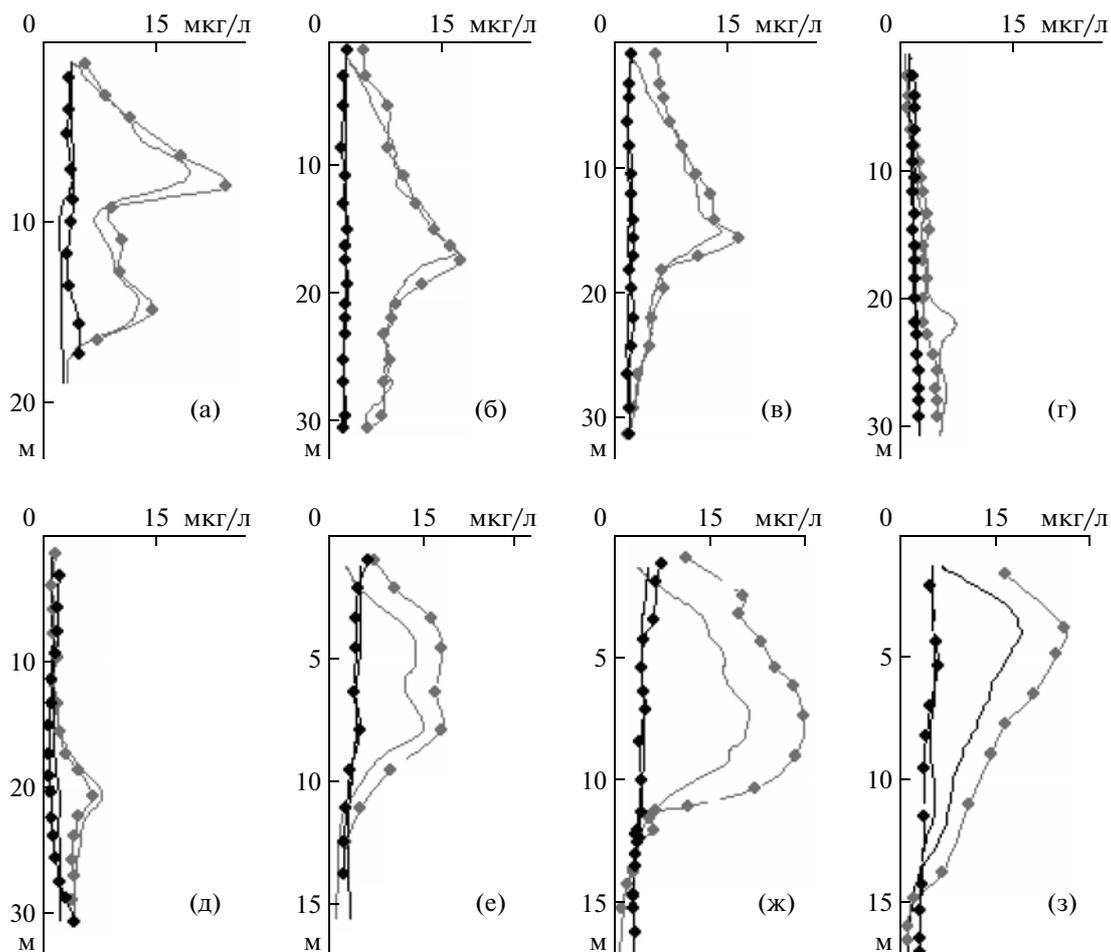


Рис. 9. Экспедиционные измерения концентрации р.о.в. (черные линии) и хлорофилла “А” (серые линии): точки – результаты измерений с использованием разработанной системы, линии без точек – результаты измерений зондом SeaBird.

результатов измерений не превышала 10%. По этим данным было определено значение коэффициентов k_A и $k_{\text{ров}}$ в формулах (5) и (6). В прибрежных акваториях с низкой прозрачностью вод разница показаний двух систем достигала 40% (рис. 9а–9з). Различие результатов измерений можно объяснить тем, что в прибрежной зоне присутствует большое количество взвесей органического и неорганического происхождения. Растворенные органические вещества флуоресцируют в широком диапазоне длин волн, увеличивая интенсивность сигнала флуоресценции, принимаемого узкополосным датчиком, в результате измеренная концентрация хлорофилла “А” оказывается завышенной. Однако повышенная концентрация взвешенных частиц приводит к ослаблению как индуцирующего, так и флуоресцентного излучений за счет поглощения и рассеяния света на этих частицах. На рис. 10 показано влияние обоих механизмов на результаты измерений концентрации хло-

рофилла “А” при наличии флуоресцирующих и рассеивающих частиц в воде.

В используемых в настоящее время флуориметрах концентрация хлорофилла “А” рассчитывается по измеренной интенсивности флуоресценции в интервале длин волн 680–690 нм. Измеренная интенсивность при этом зависит не только от концентрации хлорофилла “А”, но и от концентрации р.о.в., флуоресценция которого имеет широкий спектр. Особенно сильно это заметно, когда измерения выполняются в водах с большой концентрацией р.о.в. В этом случае узкополосный флуориметр не позволяет определить истинное значение интенсивности флуоресценции хлорофилла “А”, и расчет его концентрации выполняется с ошибкой.

В разработанной системе мониторинга строится график огибающей спектра флуоресценции воды в широком диапазоне длин волн 550–750 нм. Это позволяет выявить вклад к.р. воды и флуоресценции р.о.в. в измеренную амплитуду сигнала на

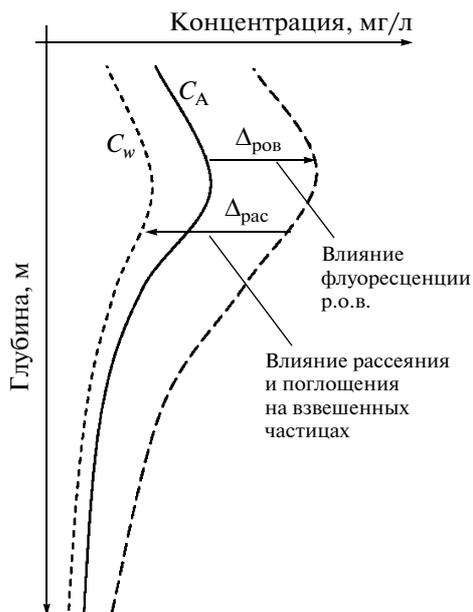


Рис. 10. Влияние р.о.в. и взвешенных частиц на результат измерения концентрации хлорофилла "А" узкополосным датчиком флуоресценции: C_A , C_w — соответственно истинная и измеренная концентрации хлорофилла "А".

длине волны флуоресценции хлорофилла "А". После обработки спектральных данных флуоресценции воды по методике, описанной выше, удастся определить истинное значение интенсивности флуоресценции хлорофилла "А" с учетом влияния р.о.в. и к.р. воды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная система позволяет определять концентрацию хлорофилла "А" и р.о.в. как в чистых водах, так и в водах с большим содержанием р.о.в. и взвешенных частиц. Технические возможности продемонстрированы в экспедиционных исследованиях морских акваторий Приморского края. Система позволяет строить профильные распределения концентраций хлорофилла "А" и р.о.в. в воде на глубинах до 100 м. Экспериментально и теоретически показано, что широкополосные измерения флуоресценции воды позволяют учесть влияние р.о.в. и взвешенных частиц при вычислении концентрации хлорофилла "А".

Особенностью системы является выполнение измерений в естественных условиях в режиме реального времени. Автоматизация процесса измерений и обработки данных существенно снижает трудоемкость работы и позволяет накапливать статистически достоверную информацию об исследуемой акватории.

Разработанная система была использована для проведения исследований микроводорослей фитопланктона совместно с Тихоокеанским океанологическим институтом ДВО РАН и Институтом биологии моря ДВО РАН. Результаты экспериментов позволяют утверждать, что точность определения концентрации флуоресцирующих веществ в чистых водах не уступает точности измерений, выполненных с применением известных флуорометрических датчиков. В прибрежных районах точность показаний разработанной системы повышается за счет проведения широкополосных измерений.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного контракта № 16.518.11.7050 Минобрнауки РФ и гранта № 09-ИН-09 Дальневосточного отделения РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глушков С.М., Фадеев В.В., Филиппова Е.М., Чубаров В.В. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 4. С. 433.
2. Карабашев Г.С. Флуоресценция в океане. Л.: Гидрометеиздат, 1987.
3. Gloge D. // Applied optics. 1972. V. 11. № 11. P. 2506.
4. Кульчин Ю.Н., Вознесенский С.С., Гамаюнов Е.Л. и др. // Измерительная техника. 2008. № 1. С. 27.
5. Майор А.Ю., Букин О.А., Крикун В.А. и др. // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20. № 3. С. 283.
6. Кульчин Ю.Н., Вознесенский С.С., Гамаюнов Е.Л. и др. // ПТЭ. 2007. № 6. С. 117.
7. Кульчин Ю.Н., Вознесенский С.С., Гамаюнов Е.Л., Коротенко А.А. Патент РФ № 96662. Класс МПК G01N21/01.//БИ. 2010. № 22.
8. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов / Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1987.
9. Букин О.А., Пермяков М.С., Майор А.Ю. и др. // Оптика атмосферы и океана. 2001. Т. 14. № 3. С. 28.
10. Клышко Д.Н., Фадеев В.В. // ДАН СССР. 1978. Т. 238. С. 320.