

Комплексный контроль состояния морских акваторий оптическими методами. Часть 4. Оптоволоконная система измерения концентрации фитопланктона

Ю.Н. Кульчин, С.С. Вознесенский, Е.Л. Гамаюнов,
А.А. Коротенко, А.Ю. Попик, А.Ю. Майор*

*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН
690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5*

Поступила в редакцию 25.05.2012 г.

Рассматриваются технические средства для осуществления оперативного контроля содержания фитопланктона методом флуоресценции в прибрежных морских акваториях. Приведены предварительные результаты мониторинга с помощью погружаемой флуориметрической системы, позволяющей выполнять измерения в режиме реального времени. Обсуждается возможность применения оптоволоконных погружаемых и прокачиваемых систем для комплексного мониторинга прибрежных акваторий.

Ключевые слова: оптоволоконный датчик, флуориметр, флуоресценция, фитопланктон; fiber optic sensor, fluorimeter, fluorescence, phytoplankton.

Введение

В первой статье настоящего цикла [1] отмечалось, что дистанционные методы измерения концентрации хлорофилла в воде, к которым относятся спутниковый и лидарный методы, эффективны для обнаружения поверхностных загрязнений в чистых океанских водах. В прибрежных водах, как правило, загрязненных естественными и техногенными веществами, эти методы не обеспечивают требуемой чувствительности и точности. Кроме того, они не позволяют контролировать распределение концентрации и состояние фитопланктона в толще воды. В таких случаях наиболее эффективными являются погружаемые или прокачиваемые станции для прямого измерения физических параметров и состава воды *in situ*. На основе таких станций может быть построен третий уровень контроля, который осуществляется с борта судна-лаборатории.

Попавшие в воду загрязнения оказывают влияние на развитие морских организмов и, прежде всего, на микроводоросли — фитопланктон, который первым реагирует на изменение состава воды. Величину концентрации фитопланктона часто используют как наиболее наглядный показатель экологического благополучия акватории. Оперативно оценить наличие

и концентрацию фитопланктона в воде позволяют методы спутникового зондирования поверхности океана, основанные на измерениях оптических спектров отражения солнечного света от воды. Точность таких измерений достаточно высока для чистых океанических вод и становится совершенно недостаточной для прибрежных вод, что обусловлено малым пространственным разрешением и выносом ила и растворенных органических веществ (РОВ) с водами рек и промышленными стоками.

Фитопланктон постоянно претерпевает изменения, поэтому для адекватной оценки экологического состояния акваторий важно осуществлять регулярное наблюдение, что требует создания средств, позволяющих выполнять измерения концентрации и состояния фитопланктона в любых погодных условиях, на любой глубине, при повышенном «загрязнении» воды различными веществами.

Наблюдения за состоянием фитопланктона могут осуществляться с борта судна-лаборатории, специально оборудованных буев, водных станций или причалов, с помощью погружаемых или прокачиваемых измерительных систем. Обзор различных способов измерения концентрации и параметров фотосинтеза фитопланктона приведен в статьях [2, 3]. Наиболее распространенные методы измерения концентрации фитопланктона основаны на изучении процесса быстрой флуоресценции. Удобство его применения обусловлено тем, что флуоресцирующий пигмент — хлорофилл *a* флуоресцирует в узком диапазоне длин волн 680–690 нм, и можно считать, что концентрация пигмента соответствует концентрации клеток фитопланктона [4].

* Юрий Николаевич Кульчин; Сергей Серафимович Вознесенский; Евгений Леонидович Гамаюнов (gammaunov@iasr.dvo.ru); Алексей Анатольевич Коротенко; Александр Юрьевич Попик; Александр Юрьевич Майор (mayor@iasr.dvo.ru).

Имеющиеся на рынке приборы для измерения концентрации хлорофилла *a* (Sea Bird, Scufa, YSI, RBR...) позволяют выполнять измерения в широком диапазоне температур и глубин в малозагрязненных океанических водах. Такие системы оказываются недостаточно точными при проведении измерений в акваториях вблизи устья рек, в прибрежных районах или в местах выброса промышленных отходов, когда в воде содержится большое количество органических и неорганических веществ. Присутствующие в воде примеси и РОВ флуоресцируют в широком диапазоне длин волн и влияют на величину показаний указанных приборов. В работах [5, 6] показано, что существенно уменьшить ошибку измерений можно при использовании широкополосного измерителя спектра флуоресценции. Впервые такой подход был реализован в Тихоокеанском океанологическом институте ДВО РАН при разработке спектрофлуориметра с прокачиваемой кюветой [7]. Впоследствии в Институте автоматики и процессов управления ДВО РАН такой спектрофлуориметр был дополнен погружаемым оптоволоконным модулем [8].

Состав измерительной системы

Основой измерительной системы (рис. 1) является бортовой модуль, в состав которого входят высокочувствительный широкополосный спектрометр 2 и лазер 3, соединяемые с помощью оптических кабелей с погружаемым модулем или через оптиче-

ский переключатель с прокачиваемой кюветой (не показаны). Погружаемый модуль соединяется с бортовым модулем с помощью кабель-троса, внутри которого находятся два кварцевых оптических волокна (ОВ) с диаметром сердцевинки 600 мкм и электрические провода. Спуск и подъем погружаемого модуля выполняются специальной лебедкой, которая устанавливается вплотную к борту судна, как это видно на рис. 2.

Погружаемый модуль выполнен 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.

Высокая чувствительность широкополосного спектрометра достигается использованием в его составе электронно-оптического усилителя с коэффициентом усиления $2 \cdot 10^4$, сопряженного с ПЗС-камерой. Эффективный спектральный диапазон измерений спектрометра составляет 540–770 нм, спектральное разрешение 5 нм. Спектрометр 2 и лазер 3 подключены к персональному компьютеру 1, с помощью которого осуществляются управление, прием и обработка результатов измерений.

Электронный блок 4 бортового модуля содержит преобразователь интерфейса RS-485 для организации связи с погружаемым модулем и лебедкой, а также блоки питания с напряжением: 24 В — для

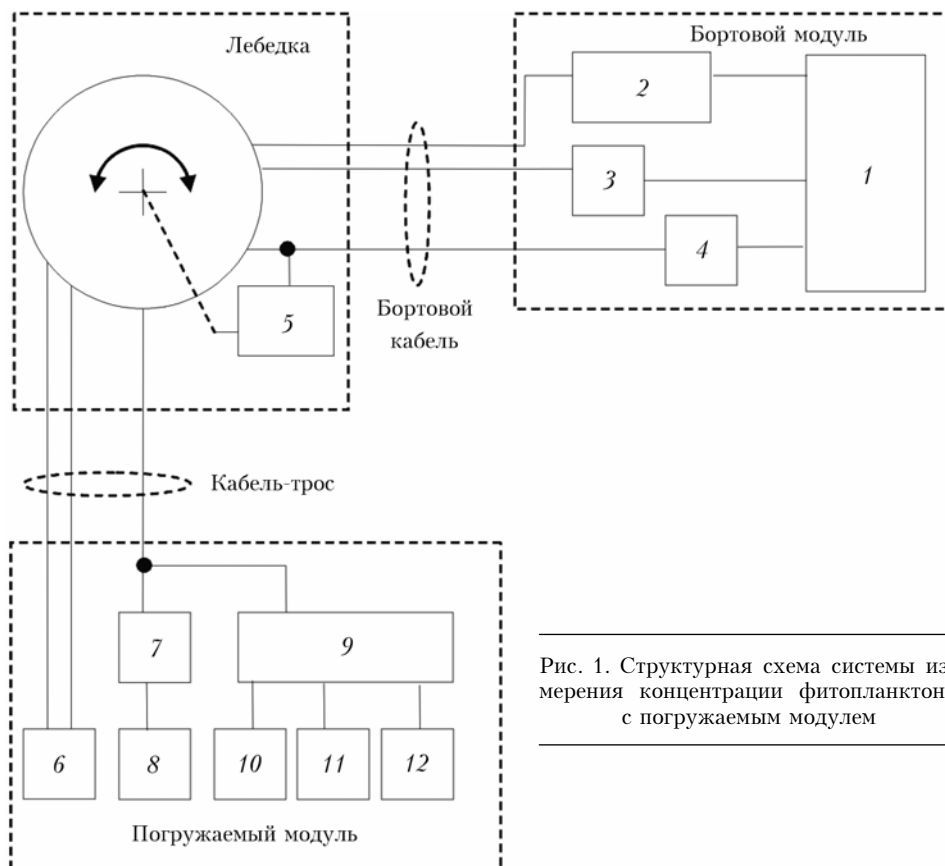


Рис. 1. Структурная схема системы измерения концентрации фитопланктона с погружаемым модулем



Рис. 2. Лебедка с погружаемым модулем на борту НИС «Импульс»

питания двигателя лебедки и 12 В — для остальных электронных модулей.

Лебедка позволяет выполнять спуск погружаемого модуля на заданную глубину, что обеспечивается датчиком давления, установленным на погружаемом модуле. Для правильной намотки кабель-троса на барабан предусмотрен тросоукладчик, а сход кабеля с барабана (с достаточным выносом за борт) обеспечивается специальной изогнутой пластиной — слипом. Слип формирует 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.

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.

Габариты лебедки с установленным погружаемым модулем составляют $1,6 \times 1,2 \times 1,3$ м.

Бортовой кабель помещен в защитную оболочку. Электрические провода и оптические волокна имеют разъемы, которые позволяют быстро выполнять сборочные работы при установке измерительной 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 волокна и электрические провода от внешнего механического воздействия. Несущий силовой элемент кабель-троса — оболочка из прочного арамидного волокна. Соединение кабель-троса с погружаемым модулем осуществляется через герметичный фланец.

Внутри герметичного корпуса погружаемого модуля расположены оптоволоконный датчик флуоресценции 6, датчики глубины 10 и температуры 11, блок управления насосом 7, датчик герметичности 12 погружаемого модуля и модуль сбора данных 9. Оптоволоконный датчик флуоресценции рабочей частью выходит в прокачиваемый объем, защищенный от рассеянного в воде солнечного света светозащитным лабиринтом, протекание воды через который обеспечивается малогабаритным насосом 8.

Оптоволоконный датчик флуоресценции представляет собой два ОВ, установленные на некотором расстоянии и под углом друг к другу, как показано на рис. 3.

Мощность флуоресцентного излучения P_{br} , направляемого по приемному ОВ, зависит от размеров области перекрытия апертур, показанной на рис. 3.

С целью определения наилучшего взаимного положения ОВ было выполнено математическое моделирование такого датчика. Некоторые результаты моделирования приведены на рис. 4 и 5.

На рис. 4 показаны графики для двух пар ОВ, имеющих диаметр сердцевины 600 нм, но отличающихся значением числовой апертуры.

Кривые 1 и 2 показывают зависимость мощности флуоресцентного излучения, направляемого по приемному ОВ, от расстояния между параллельно расположенными ОВ, т.е. при $\alpha = 0$. Принимаемая мощность может быть увеличена за счет взаимного наклона ОВ (см. рис. 3). Кривые 3 и 4 на рис. 4

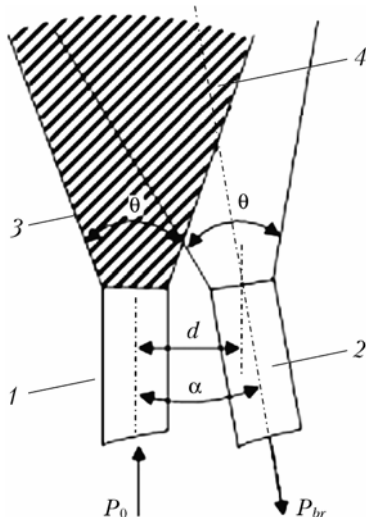


Рис. 3. Принцип действия ОВ-датчика флуоресценции: 1 – излучающее ОВ; 2 – приемное ОВ; 3 – полная область флуоресценции; 4 – область флуоресценции, воспринимаемая приемным ОВ

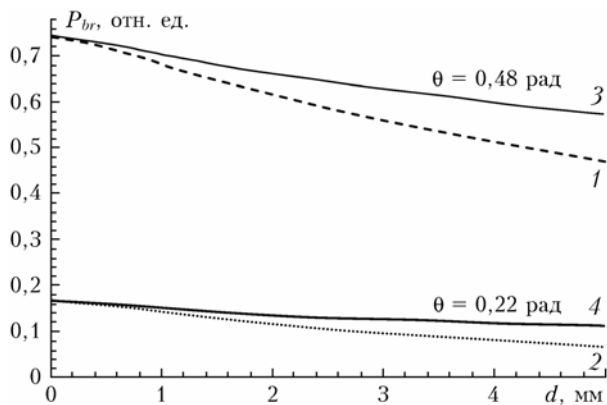


Рис. 4. Зависимость мощности излучения в приемном ОВ от расстояния между волокнами: 1, 2 – при параллельном расположении ОВ; 3, 4 – при оптимальном угле между ОВ (см. рис. 5)

построены при оптимальном угле между ОВ, при котором наблюдается максимальное значение принимаемой мощности для заданного расстояния между ОВ.

На рис. 5 показаны полученные в результате численного моделирования зависимости оптимального угла между ОВ от расстояния между ними.

Видно, что при небольших расстояниях между ОВ указанные зависимости близки к линейной и незначительно различаются для ОВ с разными численными значениями апертурного угла θ .

Приведенные на рис. 4 и 5 графики позволяют определить основные конструктивные параметры ОВ-датчика флуоресценции при его проектировании и оценить потери для разных вариантов конструктивного исполнения. При изготовлении экспериментального макета измерительной системы нами был выбран наиболее простой вариант технологического исполнения датчика с параллельным расположением ОВ и минимальным расстоянием между ними.

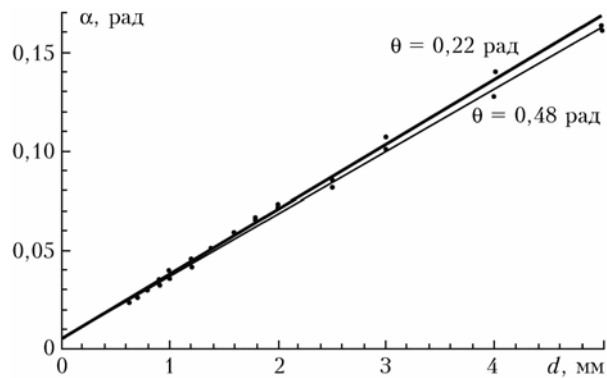


Рис. 5. Зависимость оптимального угла наклона α от расстояния d между ОВ

Общая длина погружаемого модуля составила 450 мм, диаметр 190 мм, масса модуля 8 кг.

Функционирование системы

Измерительная система управляется из общего окна пользовательского интерфейса программы, разработанной в среде графического программирования LabVIEW Professional Development System 8.6 компании National Instruments (США). Программа обеспечивает работу со всеми компонентами системы, подключенными к персональному компьютеру через разные интерфейсы связи. Пользовательский интерфейс программы 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 сохраняются и визуализируются в режиме реального времени.

Для каждой точки измерения сохраняются спектр флуоресценции воды, глубина погружения модуля и температура воды. По спектру флуоресценции вычисляются концентрации хлорофилла a и РОВ. Измеренные и вычисленные значения выводятся в виде графиков зависимости температуры, концентрации хлорофилла a и РОВ от глубины в реальном времени. Для обеспечения возможности дальнейшей обработки с помощью различных математических пакетов накопленные данные сохраняются в файле.

Обработка данных

Концентрации хлорофилла a и РОВ в воде вычисляются методом внутреннего репера комбинационного рассеяния [9, 10]. В статье [11] приведен подробный анализ повышения точности вычисления концентрации хлорофилла a в водах с большой концентрацией РОВ.

В 2011 г. на НИС «Импульс» с установленным на борту спектрофлуориметром был проведен ряд

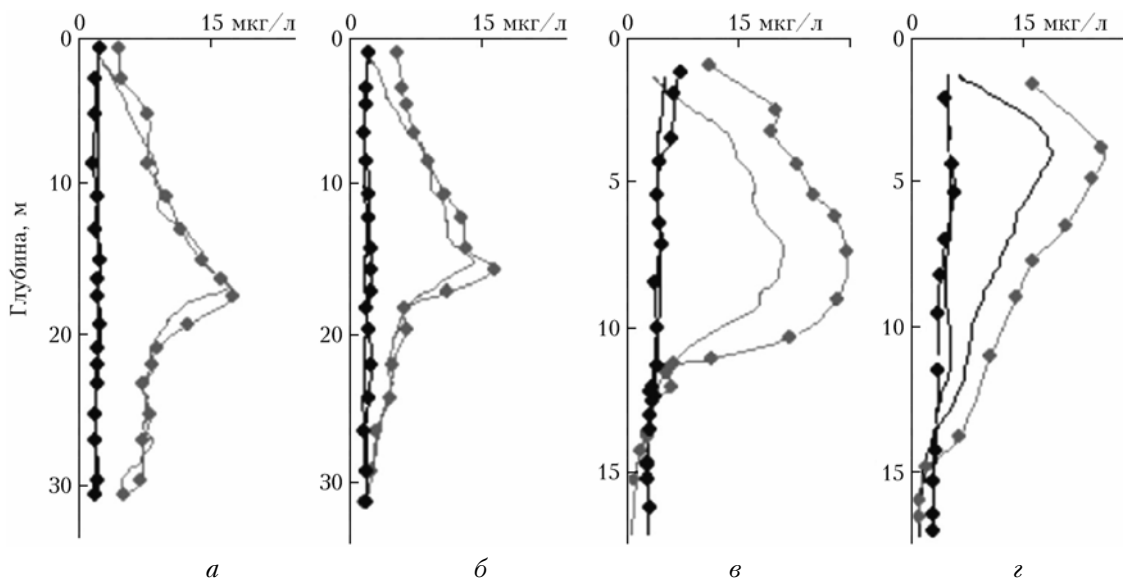


Рис. 6. Концентрация РОВ (черные линии) и хлорофилла *a* (серые линии): точки — результаты измерений с использованием разработанной системы, линии без точек — измерения зондом SeaBird

экспедиций в район бухты Витязь (залив Петра Великого). В ходе этих экспедиций выполнялись измерения и строились графики зависимости концентрации хлорофилла *a*, содержания РОВ и температуры от глубины залива. На рис. 6 показаны некоторые графики распределения фитопланктона и РОВ по глубине, полученные зондом SeaBird и разработанным спектрофлуориметром в разное время суток в ходе суточного мониторинга в Амурском заливе.

На рис. 6 видно, что при малых значениях концентрации РОВ (рис. 6, *a* и *б*) концентрации хлорофилла *a*, измеренные обоими приборами, практически совпадают, а при увеличенной концентрации РОВ — отличаются (рис. 6, *в* и *г*). Эти результаты еще раз подтверждают необходимость учета влияния РОВ и загрязнений на результаты измерений концентрации хлорофилла *a*.

Разработанная измерительная ОВ-система дает возможность определить значения концентрации хлорофилла *a* как в чистых водах, так и в водах с большим содержанием РОВ и взвешенных частиц. Результаты экспериментов позволяют утверждать, что точность определения концентрации флуоресцирующих веществ в чистых водах не уступает точности измерений, выполненных с применением известных измерительных приборов. Знание концентраций фитопланктона позволяет оценить экологическое состояние водных экосистем и вовремя узнать о начавшемся загрязнении водоема.

Автоматизация процесса измерений и обработки данных существенно снижает трудоемкость работы и позволяет накапливать статистически достоверную информацию об исследуемой акватории. Кроме того, снижается необходимость непосредственного присутствия человека при проведении измерений, оператор может отслеживать данные, находясь на достаточно большом расстоянии от места погружения модуля, что позволяет проводить измерения в мес-

тах с высоким уровнем токсического загрязнения или в опасных для человека условиях.

Заключение

Разработанная платформу измерительной системы в виде двух отдельных частей: бортовой и удаленной — погружаемой или прокачиваемой, представляется весьма перспективной и может послужить основой для создания более сложных комплексов.

Оптоволоконные технологии дают возможность создавать надежные и недорогие системы для исследования и длительного мониторинга экологического состояния акваторий. Они могут быть использованы вблизи береговой линии, в устьях рек, при любых погодных условиях и в любое время года, в том числе зимой, для определения состояния фитопланктона под ледяным покровом. Оптическое волокно позволяет размещать измерительный модуль на судне, на автономных буях и вблизи научных станций. Благодаря подключению к измерительной системе проточной кюветы можно существенно расширить диапазон использования, например выполнять измерения на ходу судна.

Реализация удаленного и программного управления позволяет проводить исследования в неблагоприятной или опасной для человека среде, а высокая степень автоматизации уменьшает нагрузку на оператора и значительно сокращает ошибки измерений, обусловленные человеческим фактором.

Комплексный подход в реализации многоуровневой системы мониторинга морских акваторий позволяет обнаруживать район и масштабы загрязнения акваторий в кратчайшие сроки. Применение систем для анализа морских вод *in situ* дает возможность определять степень воздействия на окружающую среду непосредственно в процессе исследований, что позволяет своевременно принимать решения

о мероприятиях по поддержанию и восстановлению экологии прибрежных акваторий.

Исследования выполнялись на оборудовании, уникальных стендах и установках Центра коллективного пользования «Лазерные методы исследования конденсированных сред, биологических объектов и мониторинга окружающей среды» Института автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, а также при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, госконтракт № 16.518.11.7050.

1. 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 атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 7. С. 633–637.
2. Joao Silva, Yoni Sharon, Rui Santos, Sven Beer. Measuring seagrass photosynthesis: methods and applications // *Aquat. biology*. 2009. V. 7. P. 127–141.
3. Jesus Roberto Millan-Almaraz, Ramon Gerardo Guevara-Gonzalez, Rene de Jesus Romero-Troncoso, Roque Alfredo Osornio-Rios, Irineo Torres-Pacheco. Advantages and disadvantages of photosynthesis measurement techniques // *African J. Biotechnol.* 2009. V. 8, N 25. P. 7340–7349.
4. Корнеев Д.Ю. Информационные возможности метода индукции флуоресценции хлорофилла. Киев: Альтерпрес, 2002. 188 с.
5. Букин О.А., Салюк П.А., Майор А.Ю., Павлов А.Н. Исследование процессов воспроизводства органического вещества клетками фитопланктона методом лазерной индуцированной флуоресценции // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18, № 11. С. 976–982.
6. Букин О.А., Голик С.С., Салюк П.А., Бауло Е.Н., Ластовская И.А. Изменение спектров лазерно-индуцированной флуоресценции морской воды в процессе деградации растворенного органического вещества // *Ж. прикл. спектроскопии*. 2007. Т. 74, № 1. С. 103–107.
7. Майор А.Ю., Букин О.А., Крикун В.А., Бауло Е.Н., Ластовская И.А. Компактный судовый флуориметр // Оптика атмосфер. и океана. 2007. Т. 20, № 3. С. 283–285.
8. Бортовой измерительный комплекс параметров воды: Пат. 96662. Россия, МПК, G 01 № 21/01. Кульчин Ю.Н., Вознесенский С.С., Гамаюнов Е.Л., Коротенко А.А.; Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук. № 2010110090/22; Заявл. 17.03.2010; Опубл. 10.08.2010.
9. Клышко Д.Н., Фадеев В.В. Дистанционное определение концентрации примеси методом лазерной спектроскопии по комбинационному рассеянию // Докл. АН СССР. 1978. Т. 238. С. 320.
10. Букин О.А., Пермяков М.С., Майор А.Ю., Сагалаев С.Г., Литилина Е.А., Хованец В.А. О калибровке метода лазерной флуориметрии при измерении концентрации хлорофилла *a* // Оптика атмосфер. и океана. 2001. Т. 14, № 3. С. 223–226.
11. Гамаюнов Е.Л., Вознесенский С.С., Коротенко А.А., Попик А.Ю. Система мониторинга воды с погружаемым модулем // Приборы и техн. эксперим. 2012. № 1. С. 1–9.

Yu.N. Kulchin, S.S. Voznesenskii, E.L. Gamayunov, A.A. Korotenko, A.Yu. Popik, A.Yu. Mayor. Complex monitoring of sea areas by optical methods. Part 4. Fiber optics system for measurements of the phytoplankton concentration.

The technical means for the real time control for phytoplankton by fluorescence method in coastal waters are considered. Preliminary results of the monitoring by the immersion fluorometric system for the real time measurements are given. The article discusses the possibility of using fiber optic immersible and pumped systems for integrated monitoring of coastal waters.