ЛАЗЕРНЫЙ СПЕКТРОМЕТР С ПОГРУЖАЕМЫМ ОПТОВОЛОКОННЫМ ДАТЧИКОМ

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

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток

ВВЕДЕНИЕ

Состояние морских экосистем определяет условия жизни на всей планете. Среди многих факторов, характеризующих состояние океанов и морей, особенно важным является состояние и жизнеспособность фитопланктона. Фитопланктонные сообщества обеспечивают производство от 35 до 70 % кислорода [1], 95 % растворимого органического вещества, а также активно поглощают углекислый газ [2]. Зависимость биологической продуктивности морей и Океана от концентрации фитопланктона [3] делает задачу его оперативного мониторинга очень актуальной. Концентрация фитопланктона зависит от многих факторов, среди которых наибольшее значение имеют освещенность, температура и наличие в воде органических и неорганических веществ [4]. Присутствие в воде некоторых химических соединений отрицательно влияет на жизнеспособность и воспроизводство фитопланктона, что особенно часто наблюдается в местах активной человеческой деятельности. Этим определяется необходимость ведения постоянного контроля не только за концентрацией фитопланктона, но и за содержанием в воде тех веществ, которые угнетают его жизнедеятельность. В настоящее время для этого широко применяются оптические методы, позволяющие определять концентрацию фитопланктона и других веществ в воде. Среди них наибольшее распространение получили спектральные методы [5].

Определение концентрации фитопланктона по оптическим характеристикам морской среды может выполняться пассивными и активными методами. Пассивные методы широко применяются с использованием авиа- и спутниковых носителей [4]. Эти методы основаны на измерении яркости отражаемой от поверхности воды солнечной энергии в широком диапазоне длин волн. Они позволяют собирать данные в крупных масштабах о поверхности водной среды, но имеют существенные ограничения: малое пространственное разрешение и невозможность измерения глубинных профилей. Использование пассивных методов ограничивается их невысокой точностью, что обусловлено сильным влиянием состояния атмосферы в месте проведения измерений. Активные методы основаны на облучении воды лазерным лучом и регистрации спектра флуоресценции [6]. Приборы для активных методов подразделяются на лидарные [7], прокачиваемые и погружные [8]. В тех случаях, когда требуется выполнять измерения с высокой точностью и с большим пространственным разрешением, погружным спектрометрам нет альтернативы. К таким задачам относятся: выполнение точечных замеров концентрации фитопланктона для калибровки математических моделей, используемых в пассивных методах; измерение профиля концентрации фитопланктона по глубине; непрерывный и долговременный мониторинг состава воды в местах деятельности человека; поиск полезных ископаемых под водой и др.

Погружные спектрометры могут выполняться по двум разным схемам: полностью автономные и с вынесенным датчиком. К первой группе относятся разработки, например, таких компаний, как «Turner Designs» [8], WetLabs [9], YSI [10]. Изготавливаемые ими измерители флуоресценции представляют собой активные датчики, совмещающие в себе светоизлучающие системы на основе сверхъярких светодиодов и фотоприемники на основе фотодиодов. Выделение необходимого участка спектра флуоресценции осуществляется с помощью узкополосных оптических фильтров. В том случае, когда требуется измерение флуоресценции выполнять на нескольких длинах волн, отдельные датчики собираются в системы, как это делает компания «Turner Designs» [8], датчик которой может содержать до семи чувствительных элементов, настроенных на разные длины волн. Измеренные значения яркости флуоресценции после дискретизации и математической обработки могут сохраняться во внутренней памяти или передаваться по интерфейсу RS232 на компьютер. Достоинствами таких датчиков являются их функциональная завершенность, компактность, высокая степень автоматизации измерений, что позволяет использовать их в самых раз-

личных системах мониторинга как автономных, например в автономных подводных аппаратах, так и в неавтономных, например с ручным управлением [10].

Спектрометры с вынесенным датчиком представляют собой измерительные системы, в которых оптическое устройство – датчик соединяется с регистрирующей аппаратурой с помощью оптоволоконного кабеля [11]. Достоинства такой системы вытекают из возможности размещения всего электронного оборудования за пределами среды, в которой производятся измерения, в особенности, если среда характеризуется высокой температурой, например при изучении подводных вулканов и гейзеров. Спектрометр с вынесенным датчиком позволяет включить в свой состав бортовой анализатор спектра с высокой разрешающей способностью, в результате чего можно наблюдать спектр флуоресценции в непрерывном диапазоне длин волн, а также осуществлять сколь угодно сложную математическую обработку измеренных спектров в реальном времени. Появляется возможность использовать различные источники возбуждающего излучения, включая мощные непрерывные и импульсные лазеры. Особенно важны перечисленные возможности при проведении научных исследований. Непогружаемая часть таких спектрометров может быть расположена на борту судна или буя, на стационарных сооружениях типа нефтедобывающих платформ, на подводных аппаратах с общим прочным корпусом и т. п.

Целью данной работы явилось создание лазерного спектрометра, предназначенного для контроля концентрации фитопланктона и других веществ в морской воде методом лазерной индуцированной флуоресценции. В разработанном спектрометре используется вынесенный погружаемый датчик, который обеспечивает возбуждение флуоресценции в воде и передачу ее в виде сигнала по оптическому кабелю на борт судна для дальнейшей обработки.

Описание системы

Структурная схема спектрометра приведена на рис. 1. Система состоит из бортового комплекса, погружаемого модуля и соединяющего их двужильного оптоволоконного кабеля. Бортовой комплекс включает в себя YAG:Nd лазер и систему регистрации флуоресценции, состоящую из фильтра, полихроматора и электронного оптического преобразователя с ПЗС-матрицей.

В погружаемом модуле свет лазера, доставленный по передающему оптоволокну, излучается в воду, что приводит к возбуждению флуоресценции. Флуоресцентное излучение воспринимается приемным оптоволокном и передается в бортовой комплекс.

На ПЗС-матрицу поступает принятое флуоресцентное излучение, разложенное в спектр дифракционной решеткой полихроматора 3. Мощность флуоресцентного излучения очень мала по сравнению с мощностью лазера, поэтому для ослабления проникновения излучения лазера на вход спектрометра предназначен заграждающий светофильтр 2. Диапазон длин волн, вырезаемых светофильтром, составляет от 400 до 540 нм, что незначительно ограничивает полосу пропускания измерителя флуоресценции со стороны малых длин волн.

Погружаемый модуль представляет собой металлическую конструкцию, в которой обеспечивается протекание воды через рабочую область при опускании или подъеме модуля. В рабочей области погружаемого модуля расположен оптоволоконный датчик флуоресценции, в ко-

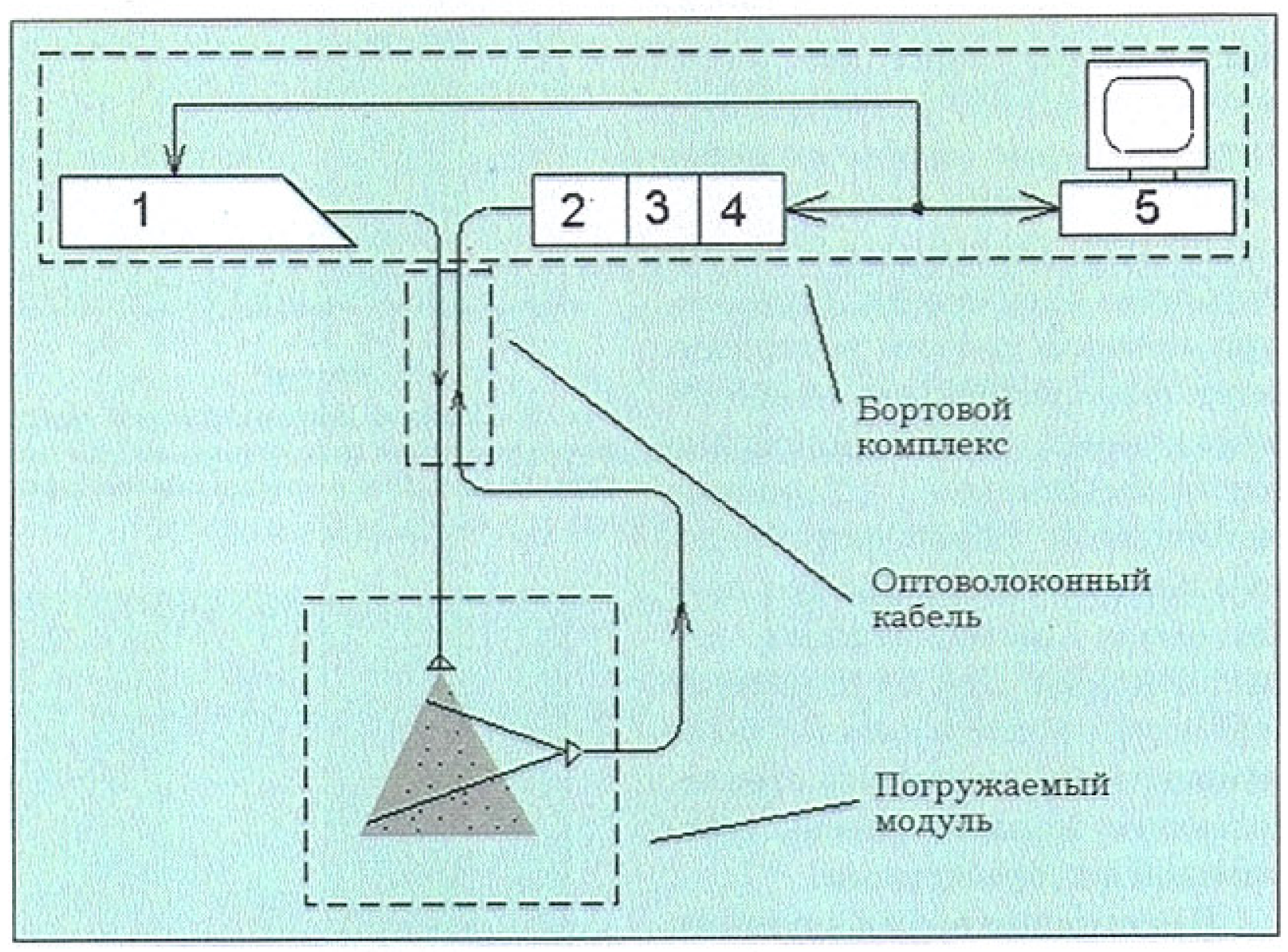

Рис.1. Структурная схема спектрометра: 1 – источник излучения YAG:Nd лазер; 2 – светофильтр; 3 – полихроматор; 4 – электронно-оптический преобразователь (ЭОП) с ПЗС-матрицей; 5 – персональный компьютер

Рис. 2. Погружаемый модуль

торый входят оптоволокна для возбуждения и приёма флуоресцентного излучения. Этот модуль также защищает датчик флуоресценции от прямого и рассеянного в воде солнечного света. Защита от проникновения солнечной энергии в активную зону датчика основана на обеспечении потерь света при многократном отражении лучей от внутренних элементов конструкции, имеющих специальное светопоглощающее покрытие. Фотография погружаемого модуля приведена на рис. 2.

Оптоволоконный датчик представляет собой два оптических волокна, размещённых таким образом, чтобы их апертуры как можно больше перекрывались. Оптимальное расположение оптических волокон, при котором датчик воспринимает флуоресценцию наиболее эффективно, было подобрано экспериментально. Торцовые поверхности оптических волокон в морской воде быстро покрываются органическими загрязнениями. Для их защиты от контакта с водой в датчике было использовано кварцевое стекло, имеющее малый уровень собственной флуоресценции.

В настоящее время лучшими для измерителя флуоресценции можно считать кабели с кварцевыми волокнами, которые обеспечивают полосу пропускания от 450 до 800 нм при неравномерности АЧХ не более 10 дБ. Кварцевые волокна имеют гладкую АЧХ при небольших потерях (< 3 дБ/км), что позволяет иметь длину оптоволокна в измерителе до нескольких сотен метров. Для увеличения принимаемой мощности флуоресценции был использован оптоволоконный кабель с большим диаметром кварцевой сердцевины – 600 мкм. Широкая полоса пропускания кварцевого волокна позволяет проводить измерения флуоресценции в большом диапазоне длин волн.

Эксперименты

Изготовленный экспериментальный образец погружного измерителя флуоресценции имеет следующие параметры:

– длина оптического кабеля – 30 м (возможно увеличение до 100 м);
– габаритные размеры погружаемого модуля – 270 × 190 × 140 мм;
– масса погружаемого модуля – 3,5 кг;
– длина волны излучения лазера – 532 нм;
– длительность лазерных импульсов – 6 нс;
– импульсная мощность лазерного излучения – 1–20 мДж;
– диапазон длин волн регистрации флуоресценции – 540–780 нм;
– время измерения – 1–10 с.

На рис. 3 показаны некоторые из измеренных спектров флуоресценции дистиллированной и морской воды.

Пики в диапазоне от 560 до 630 нм соответствуют флуоресценции различных растворённых органических веществ (РОВ), присутствующих в воде. Большой пик на 650 нм – сигнал комбинационного рассеяния (КР) воды. Пик на 680 нм обусловлен флуоресценцией хлоро-

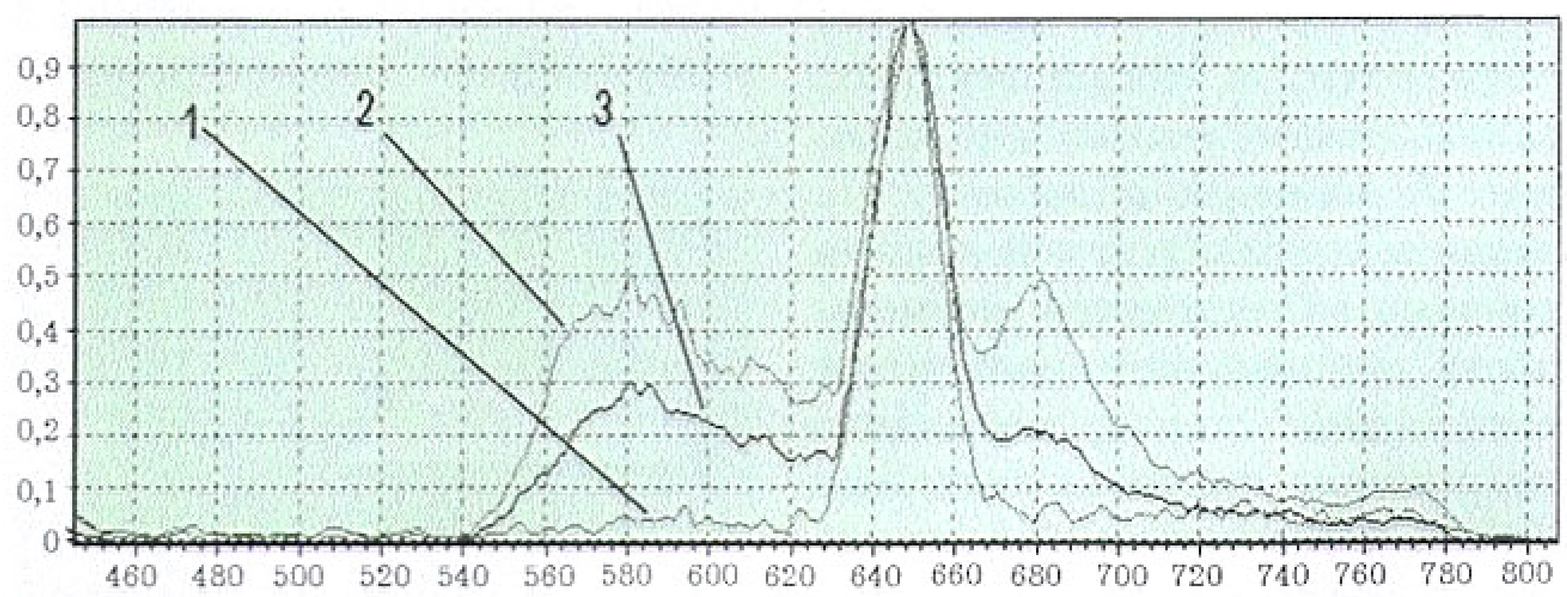

Рис. 3. Спектры флуоресценции дистиллированной и морской воды: 1 – кривая флуоресценции дистиллированной воды; 2, 3 – кривые флуоресценции морской воды (в сентябре и ноябре соответственно)

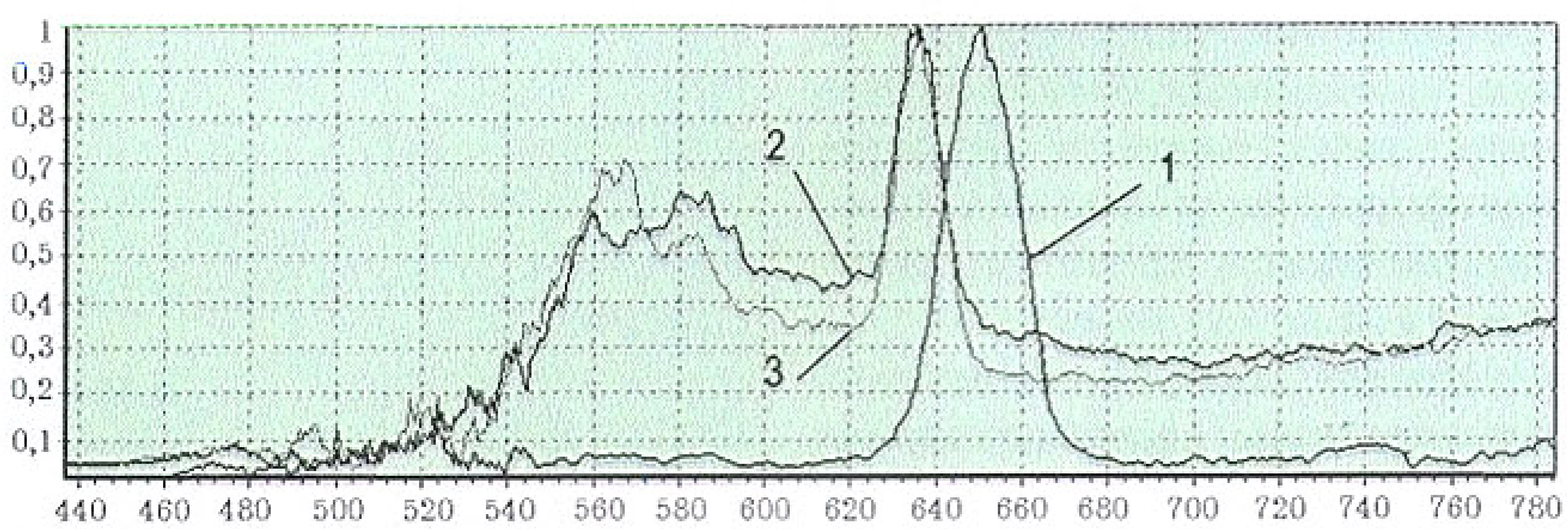

Рис. 4. Спектры флуоресценции: 1 – дистиллированной воды, 2 – ацетона, 3 – толуола

филла А. Сигнал с частотными составляющими до 540 нм полностью гасится фильтром, для исключения перегрузки ЭОП от воздействия лазерного излучения. Приведенный график является результатом усреднения десяти измерений для каждой кривой. Время накопления сигнала на ПЗС-матрице для каждого измерения составило 10 с. Измерения проводились при дневном свете.

Сравнивая графики флуоресценции дистиллированной и морской воды, можно определить отношение сигнал/шум измерителя флуоресценции:

$$\xi=10 \lg (P_{из}/P_{ш} - 1),$$

где $P_{из}$ и $P_{ш}$ – мощности измерения и шума.

На длине волны флуоресценции хлорофилла А – 680 нм – ξ изменяется от 4 до 11 дБ для разных значений концентрации. На длине волны измерения РОВ – 580 нм – отношение сигнал/шум изменялось от 8 до 11 дБ.

Для сравнения информативности получаемых данных на рис. 4 приведены спектры флуоресценции воды, толуола и ацетона.

Из графиков видно, что спектры комбинационного рассеяния толуола и ацетона на длинах волн от 550 до 630 нм существенно отличаются, что можно объяснить различиями в строении их молекул. Яркость флуоресценции для этих веществ существенно превышает яркость флуоресценции воды, что позволило уменьшить время экспозиции ПЗС в 10 раз.

ВЫВОДЫ

Представленный в настоящей статье лазерный спектрометр отличается наличием погружаемого модуля, который не содержит электронных компонентов, не требует специальной защиты и электрического питания. Разделение каналов возбуждения и измерения обеспечивает универсальность погружаемого модуля, так как становится возможным его сопряжение с оптическим оборудованием разных производителей. Появляется возможность расширения функций путем использования на борту судна различных источников и приемников светового излучения и применения разных способов его обработки. Работа системы измерения флуоресценции не зависит от погодных и временных условий, что позволяет выполнять непрерывные измерения в любое время суток.

Измеритель флуоресценции обладает широким диапазоном изменения мощности возбуждающего лазерного излучения, высокой чувствительностью и широкополосностью. Отсутствие электронных компонентов в погружаемом модуле определяет его высокую надежность и практичность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Климов В.В. Фотосинтез и биосфера [Электронный ресурс] // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 6. С. 6–13. Электронный журнал. Режим доступа к журналу : http://journal.issep.rssi.ru. Доступен также на опт. дисках. Загл. с экрана.

2. Романкевич Е.А. Геохимия органического вещества в океане. М.: Наука, 1977. 256 с.

3. Hoge F.E., Wriglit C.W., Krabill W.B. Airborne lidar detection of subsurface oceanic scattering layers // Applied Optics. 1988. October. Vol. 27. P. 3969–3977.

4. Gordon H.R., Clark D.K., Brown J.W. Phytoplankton pigment concentrations in the Middle Atlantic Bright // Applied Optics. 1983. January. Vol. 22. P. 20–36.

5. Measures R.M. Laser Remote Sensing, Fundamentals and Applications. New York: Willay, 1984.

6. Рубин А.Б. Биофизические методы в экологическом мониторинге [Электронный ресурс] // Соросовский образовательный журнал. 2000. Т. 6, № 4. С. 7–13. Электронный журнал. Режим доступа к журналу: http://journal.issep.rssi.ru. Доступен также на опт. дисках. Загл. с экрана.

7. Barbini R., Colao F., Fantoni R., Micheli C., Palucci A., Ribezzo S. Design and application of a lidar fluorosensor system for remote monitoring of phytoplankton // ICES J. Mar. Sci. 1998. Vol. 55. P. 793–802.

8. SCUFA Submersible Fluorometr: [Electronic resource] // Turner Designs (USA). Electronic data. Mode of access: http://www.turnerdesigns.com/t2/instruments/scufa.html. Title from screen.

9. WET Labs Instruments: [Electronic resource] // WET Labs (USA). Electronic data. Mode of access: http://www.wetlabs.com/products/index.htm. Title from screen.

10. Chlorophyll Sensor: [Electronic resource] / YSI (UK). Electronic data. Mode of access: https://www.ysi.com/portal/page/portal / YSI_Environmental / Products. Title from screen.

11. Пат. 57009 Российская Федерация, МПК[7] G 01 N 21/64. Судовой лазерный спектрометр / Букин О.А., Кульчин Ю.Н., Майор А.Ю., Крикун В.А., Вознесенский С.С. Заявитель и патентообладатель ТОИ ДВО РАН. № 2006110722/22; заявл. 03.04.2006, опубл. 27.09.2006. Бюл. № 27. 2 с.