

## Опыт создания флуориметрических комплексов для использования на стационарных и мобильных станциях контроля водной среды

*А.П. Будник<sup>1</sup>, П.С. Пляка<sup>1,2</sup>*

*<sup>1</sup>Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону*

*<sup>2</sup>Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону*

**Аннотация:** В работе представлены конструктивные решения и результаты испытаний при разработке серии проточных и портативных флуориметрических комплексов для использования на стационарных и мобильных станциях контроля концентрации фитопланктона в воде. Представлен пример объединения комплексов в единую систему экологического мониторинга прибрежных зон.

**Ключевые слова:** экологический мониторинг, научное приборостроение, флуориметр.

### Введение

Спектральный метод флуоресценции нашел широкое применение в мониторинге качества природных вод [1]. Он включает контроль концентрации фитопланктона по флуоресценции хлорофилла-А (хл-А) и флуоресцирующих растворенных органических веществ (РОВ). Содержание фитопланктона в морской воде и динамика его измерения свидетельствуют не только о состоянии первичной кормовой базы, но и об уровне загрязненности водоемов [2]. К РОВ относятся белки, пептиды, нуклеиновые, гуминовые и фульвовые кислоты, прочие органические соединения [3].

Вопросам механизма флуоресценции хл-А и её практического анализа посвящено множество работ, включая обзорные [4, 5]. Задачи проведения контактного экспресс-анализа проб воды, равно как и дистанционного зондирования поверхности протяженных водоёмов, дали толчок развитию соответствующих направлений научного приборостроения [6, 7]. Как пример классификации флуориметры или, более обобщенно, флуориметрические комплексы (ФК) можно разделить на стационарные лабораторные приборы и переносные измерительные комплексы, состоящие из пространственно-разделённых датчика и блока сбора и передачи данных. И хотя на рынке представлено большое число коммерчески-производимых устройств, такие

---

факторы как специфика научно-исследовательских задач и ограниченное финансирование стимулируют разработку новых образцов ФК [8]. В частности, в целях комплексного исследования концентрации хл-А в водоёмах Юга России в ЮНЦ РАН были изготовлены экспериментальные образцы ФК на основе модифицированного фотометра [9] и детектора с мощными светодиодами [10].

В данной публикации мы представим опыт создания станций контроля концентрации фитопланктона в водной среде прибрежных акваторий с помощью проточных и погружных флуориметрических комплексов (ФК), установленных на судах (ФКС) и на береговых постах (ФКБ). В частности, разработанные ФКС использовались на научно-исследовательском судне (НИС) «Денеб» ЮНЦ РАН, а ФКБ на посту «Кагальник» ЮНЦ РАН, на Гидрофизической платформе РАН в п. Кацивелли, республика Крым и прибрежной платформе АН Абхазии в г. Сухум для мониторинга прибрежных акваторий морей.

### **Описание флуориметрических комплексов**

ФК были разработаны для проведения автоматических контактных измерений параметров водной среды (хл-А, фРОВ, растворенный кислород и температура), накопления, передачи и комплексной обработки данных. На основе проведенного анализа возможных вариантов исполнения ФК была выбрана блочно-модульная конструкция, имеющая ряд преимуществ перед цельно-модульной: она облегчает монтаж, наладку, обслуживание и модернизацию оборудования ФК в исполнениях ФКС и ФКБ. ФКС были изготовлены в проточном и погружном вариантах. Проточный ФКС предназначен для непрерывного получения данных о параметрах заборной воды, протекающей по установленной на судне трубопроводной системе прокачки. Погружной выполнен в герметичном спускаемом в воду зонде.

---

ФК (Рис. 1а) состоит из унифицированного базового блока (ББ) и подключаемых к нему датчиков различного назначения, как представлено на Рис. 1. ББ (Рис. 1б) собран в стандартном герметизированном (IP65 и NEMA 4) пластиковом корпусе G218 (Gainta) для радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). В нем размещены печатная плата модуля управления, электрические соединители, элементы индикации, аккумулятор G12-2,3. Модуль управления ББ ФК содержит электронные ключи подачи питания на четыре 4-х контактных разъема для подключения датчиков, микросхемы поддержки передачи данных по интерфейсу RS-485 и USB, преобразователь напряжения  $\sim 220/+12$  В, соединитель для обмена данными с внешним модемом, система контроля напряжения аккумулятора и его подзарядки. Работой ББ управляет микроконтроллер ATmega324A (ATMEL).

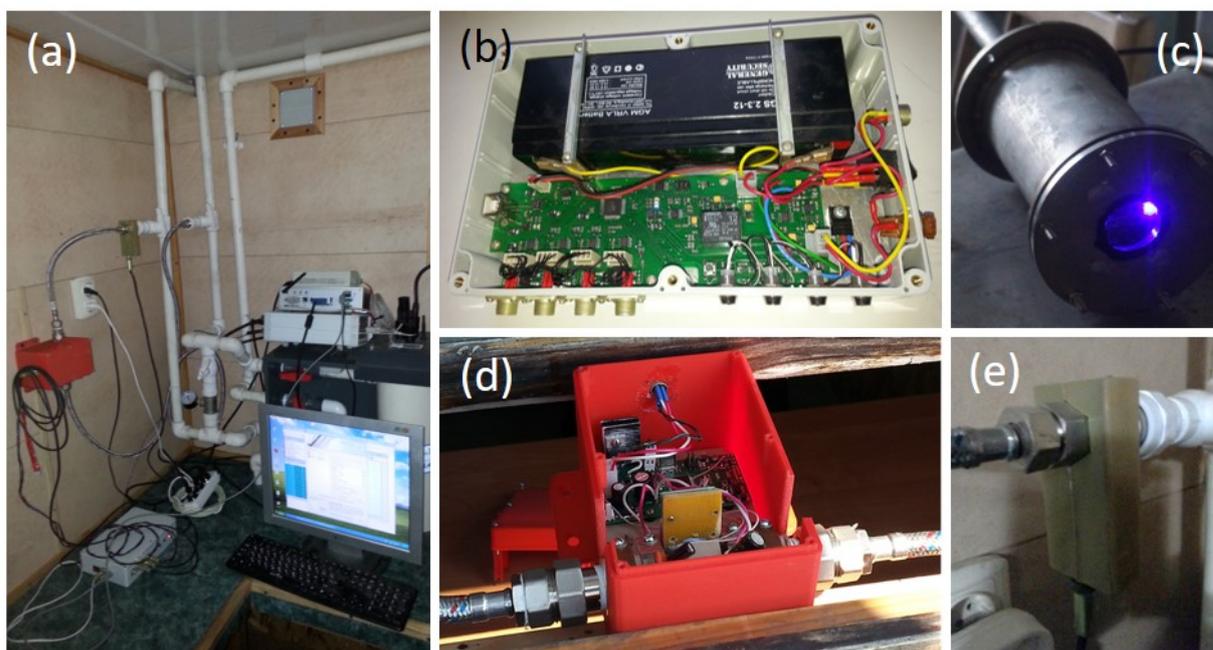


Рис. 1 – ФКС (а) и её компоненты: базовый блок (б), погружной датчик (с), проточный датчик (д), температурный датчик (е).

Функции ББ включают управление и контроль работы ФК, питание датчиков, их периодический опрос, получение данных от датчиков по линии

связи RS-485, передачу данных по USB каналу на внешнее устройство (компьютер). Датчики отличаются конструкцией, принципом действия и схемотехническими решениями, при этом имеют унифицированное питание и стандартный протокол связи RS-485.

Концентрация фитопланктона в воде определяется по интенсивности прижизненной флуоресценции хл-А. Поскольку максимум поглощения хл-А приходится на длину волны  $\sim 445$  нм [1], в ФК использованы мощные светодиоды с центральной длиной волны 447,5 нм. Для селекции полос флуоресценции на 685 и 740 нм, и подавления возбуждающего излучения были применены интерференционные светофильтры, рассчитанные на пропускание в полосах 680-700, 710-770 и 659-790 нм. В качестве детекторов излучения были выбраны кремниевые фотодиоды, хорошо работающие в видимом и ближнем ИК диапазонах.

Корпус погружного датчика флуоресценции хл-А цилиндрической формы изготовлен из нержавеющей стали, и состоит из нескольких деталей, соединенных аргоновой сваркой и при помощи фланца с резиновым уплотнением (Рис. 1с). Проточный датчик изготавливался с прозрачной трубкой круглого сечения и внутренним диаметром 17 мм в двух вариантах: в корпусе, полученном методом 3D-печати (Рис. 1d), и в стандартном корпусе G369MF для РЭА. Модуль управления ББ погружного датчика отличается наличием энергонезависимой памяти объемом 16 МБ и отсутствием преобразователя напряжения  $\sim 220/+12$  В, поскольку аккумулятор заряжается при подаче внешнего напряжения 6-18 В.

ФК для фРОВ имел схожую с ФК для хл-А конструкцию и одинаковые электронные модули, отличаясь лишь выбором оптических фильтров и возбуждающих светодиодов, настроенных на желто-зеленый диапазон фРОВ с максимумом на длине волны  $\sim 490$  нм. Также был изготовлен проточный

цифровой датчик температуры, в котором тепловой контакт с водой, обеспечивался металлической втулкой (Рис. 1е).

### **Тестовые испытания флуориметрических комплексов**

После сборки компонентов ФК были проведены тестовые испытания системы (Рис. 1а). Экспериментальная проверка работоспособности и калибровка ФКС проводилась в ходе экспедиционных исследований в акватории Азовского моря на НИС «Денеб». Для этого производился отбор проб и проводились измерения по стандартной методике. Результаты выполнения 21 замера на разных участках акватории показали среднюю концентрацию хл-А 32,4 мкг/л. были протестированы на береговых гидрометеорологических постах. Было осуществлено по 10 ежедневных замеров, которые дали средние значения хл-А от 21,8 мкг/л до 67,4 мкг/л.

Во всех вариантах испытания ФКБ передача данных осуществлялась по беспроводным сетям GPS с использованием радиомодема SprutNet Pro RS232/RS485 со скоростью передачи до 14,4 kbps. В акватории Азовского моря есть обширные зоны, не покрытые GSM связью, поэтому при испытаниях на НИС Денеб передача данных с ФКС осуществлялась при помощи широкополосного спутникового терминала Iridium Pilot. Терминал работал в диапазоне 1616-1626,5 МГц с квадратурной фазовой манипуляцией, обеспечивающей частотный интервал FDMA 41,67 кГц. Азимутальная антенная решетка из 6 двоянных элементов и 1 зенитального элемента с электронной коммутацией и фазовым управлением обеспечивала устойчивую связь по всему маршруту следования.

Представленные ФК могут быть объединены во временные (для тематических исследований) и постоянные сети мониторинга (для постоянного наблюдения), как это было сделано в случае экспериментального образца биотехнической системы наземно-космического мониторинга (ЭО БСНКМ) шельфовых зон морей, разработанной ЮНЦ РАН.

Результаты передаются по каналу сотовой связи EDGE на сервер ЮНЦ РАН в базу данных MySQL обеспечивающую хранение и доступ.

В настоящее время в открытом доступе по адресу <http://meteo.ssc-ras.ru> организован интернет-ресурс. В режиме реального времени отображаются данные со всех комплексов ЮНЦ РАН, существует возможность получить выборку за определенный период времени.

*Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН на 2019 г. № гр. проекта АААА-А19-119040390084-3.*

### Литература

1. Карабашев Г.С. Флуоресценция в океане. Л.: Гидрометеиздат. 1987. 199 с.
2. Owens O.H., Esaias W.E. Physiological Responses of Phytoplankton to Major Environmental Factors // Ann. Rev. Plant Physiol. 1976, V. 27, P. 461-483.
3. Милюков А.С., Пацаева С.В., Южаков В.И., Горшкова О.М., Пращикина Е.М. Флуоресценция наночастиц растворенного органического вещества в природной воде // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2007. №6. С. 34-38.
4. Maxwell K., Johnson G.N. Chlorophyll fluorescence – a practical guide // J. Exp. Bot. 2000. V. 51. P. 659-668.
5. Murchie E.H. and Lawson T. Chlorophyll fluorescence analysis: a guide to good practice and understanding some new applications // J. Exp. Bot. 2013. V. 64. pp. 3983-3998.
6. Catherine A., Escoffier N., Belhocine A., Nasri A.B., Hamlaoui S., Yepremian C., Bernar C., Troussellier M. On the use of the FluoroProbe, a phytoplankton quantification method based on fluorescence excitation spectra for large-scale surveys of lakes and reservoirs // Water Research 2012. V. 46. pp. 1771-1784.

7. Матишов Г.Г., Поважный В.В., Бердников С.В., Мозес В.Дж., Гительсон А.А. Оценки концентрации хлорофилла А и первичной продукции в Азовском море с использованием спутниковых данных. Доклады Академии наук. 2010. Т. 432. С. 563-566.

8. Leeuw T., Boss E.S., Wright D.L. In situ Measurements of Phytoplankton Fluorescence Using Low Cost Electronics // Sensors. 2013. V. 13. pp. 7872-7883.

9. Поважный В.В. Определение концентрации хлорофилла "а" комбинированным методом с использованием модифицированного фотометра // Океанология. 2012. Т. 52. С. 600-605.

10. Поважный В.В. Флуориметр на основе мощных светодиодов для определения концентрации хлорофилла "а" // Океанология. 2014. Т. 54. С. 419-424.

### References

1. Karabashev G.S. Flyuorestsentsiya v okeane [Fluorescence in the ocean]. L.: Hydrometeoizdat. 1987. 199 p.

2. Owens O.H., Esaias W.E. Physiological Responses of Phytoplankton to Major Environmental Factors. Ann. Rev. Plant Physiol. 1976, V. 27, pp. 461-483.

3. Milyukov A.S., Patsaeva S.V., Yuzhakov V.I., Gorshkova O.M., Prashikina E.M. Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 3. Fizika. Astronomiya. 2007. № 6. pp. 34-38.

4. Maxwell K., Johnson G.N. Chlorophyll fluorescence – a practical guide. J. Exp. Bot. 2000. V. 51. pp. 659-668.

5. Murchie E.H. and Lawson T. J. Exp. Bot. 2013. V. 64. pp. 3983-3998.

6. Catherine A., Escoffier N., Belhocine A., Nasri A.B., Hamlaoui S., Yepremian C., Bernar C., Troussellier M. Water Research. 2012. V. 46. P. 1771-1784.

7. Matishov G.G., Povazhnyy V.V., Berdnikov S.V., Mozes V.J., Gitelson A.A. Otsenki kontsentratsii khlorofilla A i pervichnoy produktsii v Azovskom



more s ispol'zovaniyem sputnikovykh dannykh [Estimations of the concentration of chlorophyll A and primary production in the Sea of Azov using satellite data]. Doklady Akademii nauk. 2010. V. 432. pp. 563-566.

8. Leeuw T., Boss E.S., Wright D.L. Sensors. 2013. V. 13. pp. 7872-7883.

9. Povazhnyi V. V., Determination of the Chlorophyll “a” Concentration Using a Combined Method Based on Measurements with a Modified Photometer, Oceanology. 2012, V. 52. pp. 561-565.

10. Povazhnyi V.V., A Fluorometer on the Basis of Powerful Light Emitting Diodes for Determination of the Chlorophyll “a” Concentration, Oceanology. 2014, V. 54. pp. 387-391.