

**ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ
В ЛАБОРАТОРИЯХ**

УДК 535.372

ПОДВОДНЫЙ ЗОНД-ФЛУОРИМЕТР

©2025 г. А. Ю. Майор^{a,*}, А. Н. Павлов^{a,}, Д. Ю. Прощенко^{a,b},
К. А. Шмирко^a, И. О. Букин^b, П. А. Салюк^c**

Поступила в редакцию 25.07.2025 г.

После доработки 18.08.2025 г.

Принята к публикации 27.08.2025 г.

**e-mail: mayor@iacp.dvo.ru*

***e-mail: anpavlov@iacp.dvo.ru*

Для мониторинга вертикального распределения фитопланктона и растворенного органического вещества в верхнем (фотическом) слое акваторий создано немало датчиков и устройств. Все они основаны на регистрации светоиндуцированной флуоресценции пигментов фитопланктона (хлорофиллы, фикобелин, фикоэритрин и др.) и органических молекул, сопровождающих его жизнедеятельность.

Погружные приборы построены по одноканальной схеме – один источник возбуждения (светодиод с фильтром) и один приемник (фотодиод с фильтром) на каждое исследуемое вещество [1, 2]. Модуляция источника и синхронный приемник позволяют достичь хорошей чувствительности. Но калибровка таких приборов корректна только в условиях открытого моря и океана. В условиях шельфовых, прибрежных, замутненных вод, сильных течений (апвеллинг), малых глубин, где значительно влияние как природных, так и антропогенных выносов, даже использование нескольких каналов часто не решает эту проблему.

^a Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, Россия, Владивосток

^b Морской государственный университет им. Г.И. Невельского
Россия Владивосток

^c Институт океанологии им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук, Россия, Владивосток

Ранее нами был разработан и создан проточный судовой флуориметр [3, 4], позволяющий более корректно определять концентрацию хлорофилла А в морской воде различных оптических типов на фоне широкой полосы флуоресценции растворенной органики. Он позволяет регистрировать по ходу судна сигнал флуоресценции в диапазоне 390–780 нм с одного приповерхностного горизонта шириной около метра и глубиной от 1 до 4 м (в зависимости от судна), что позволяет определять содержание фитопланктона и наличие углеводов в этом слое морской воды по ходу судна.

Для регистрации вертикального профиля распределения фитопланктона нами был разработан и создан погружной подводный флуориметр, способный работать и в прибрежных, замутненных водах. Пример спектров для вод разной мутности и уровня растворенного органического вещества (РОВ) приведен на рис. 1. Прибор регистрирует сигнал люминесценции одновременно в диапазоне 570–800 нм, что позволяет корректно определять интенсивности линий пигментов фитопланктона, пик ФЛ Хл-А на рис. 1 и линию комбинационного рассеяния (КР) воды, пик КР на рис. 1, независимо от уровня широкополосной флуоресценции РОВ, пик РОВ на рис. 1.

Рис. 1. Спектры флуоресценции для вод разной мутности и уровня РОВ с разложением на составляющие.

Использование лазера позволяет использовать метод КР-репера (по сигналу комбинационного рассеяния воды 3400 см^{-1}), применяемый, как правило, для лидарных измерений, для коррекции интенсивности сигнала флуоресценции при изменении мощности излучения лазера, а также уровня поглощения и рассеяния исследуемой среды. Это существенно расширяет круг исследуемых акваторий и решаемых задач. Схема разработанного прибора представлена на рис. 2.

Рис. 2. Схема подводного флуориметра

В качестве источника излучения использован компактный непрерывный YAG-лазер с диодной накачкой, генератором второй гармоники с длиной волны 527 нм (DTL-413, ООО “Лазер-Компакт”) и программной регулировкой выходной мощности от 0 до 500 мВт (8, 9). Диаметр луча лазера увеличивается коллиматором Edmund optics10X (10) до 8–9 мм. Далее излучение лазера проходит через поворотное зеркало 11 и иллюминатор накачки 20 и попадает в исследуемую среду, прокачиваемую через светозащитный кожух 12 помпой 4. Водозаборные отверстия обрамлены светозащитными лепестками, позволяющими блокировать рассеянное солнечное излучение и регистрировать сигнал флуоресценции морской воды с первого метра погружения. Возбужденный лазерным излучением сигнал флуоресценции среды проходит через приемный иллюминатор 20 и

фильтр 10CGA-570 (Newport) 19, блокирующий лазерное излучение, в приемный объектив 18 и затем по многоволоконному световоду 17 попадает на вход малогабаритного светосильного спектрографа с фиксированной решеткой 16. Входной конец световода с круговой укладкой установлен в фокусе объектива, выходной конец световода с линейной укладкой $4 \times 0.1 \text{ мм}^2$ установлен на место входной щели спектрографа. Рабочий диапазон спектрографа составляет 500–800 нм, разрешение равно 1 нм, что достаточно для регистрации комбинационного рассеяния воды, флуоресценции хлорофилла А и других пигментов фитопланктона, с полуширинами линий 10–18 нм. На выходе спектрометра в фокальной плоскости установлен усилитель яркости изображения – электрооптический преобразователь третьего поколения с фотокатодом на основе арсенида галлия 15 (102Г-05-22А, ОАО “Катод”). С его выхода усиленное изображение спектра регистрируется ПЗС-камерой 14 (Видеоскан 285 USB, ООО “УВН технологии”) и передается в бортовой миникомпьютер формата ITX-nano 13 (Celeron J1900), который преобразует изображение спектра в график (рис. 1) и обеспечивает передачу данных в режиме реального времени на поверхность в управляющий компьютер. Для контроля температуры среды и глубины погружения установлены датчики давления и температуры 22 (MS5837-30BA и TSYS01, TE Connectivity) с контроллером 21 на базе Arduino UNO, передающим данные с датчиков в бортовой миникомпьютер. Управление и питание флуориметра осуществляются компьютером 1 и блоком питания 2, расположенными на борту судна, по кабелю через герморазъем 5.

Фотографии прибора приведены на рис. 3. Размер прочного корпуса со светозащитным кожухом составляет $\varnothing 24 \times 70 \text{ см}^2$.

Рис. 3. Подводный флуориметр: **а** – прибор в сборе, **б** – прибор без корпуса.

Разработанный прибор позволяет корректно определять содержание хлорофилла А и других пигментов фитопланктона, РОВ в воде при различных уровнях мутности, РОВ и мощности лазерного излучателя. Возможен выбор оптимального уровня мощности оптической накачки исследуемой среды. Светозащитный кожух с прокачкой позволяет работать с первого метра погружения при солнечной подсветке. Для открытых акваторий шельфа чувствительность прибора не хуже 0.05 мкг/л для хлорофилла А. Это делает прибор востребованным при исследовании как шельфовых мелких акваторий с высокой динамикой оптических свойств, так и открытых океанических акваторий.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-77-00004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. https://www.walz.com/products/chl_p700/diving-pam-II/spec_diving-pam-II.html
2. <https://www.seabird.com/eco-v2-fluorometer/product-downloads?id=70096463024>
3. <https://poleznayamodel.ru/model/10/108844.html>
4. *Salyuk P., Mosharov S., Frey D. et al.* // Water. 2022. V. 14. № 23. P. 3879.
<https://doi.org/10.3390/w14233879>

Адрес для справок: Россия, 690041, Владивосток, ул. Радио, 5, Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук. E-mail: mayor@iacp.dvo.ru

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Спектры флюоресценции для вод разной мутности и уровня РОВ с разложением на составляющие.
- Рис. 2.** Схема подводного флуориметра: 1 – судовой блок питания (220 В AC → 300 В DC), 2 – судовой компьютер, 3 – гермоввод кабеля питания помпы, 4 – помпа прокачки воды, 5 – герморазъем, 6 – блок питания флуориметра (300 В DC → 48 В, 12 В, 3 В DC), 7 – блок питания помпы (12 В), 8 – блок питания и управления лазера, 9 – лазер возбуждения, 10 – расширитель луча лазера, 11 – дихроичное зеркало 527 нм, 12 – светозащитный кожух, 13 – бортовой компьютер, 14 – ПЗС-камера, 15 – электрооптический преобразователь, 16 – спектрограф, 17 – многоволоконный световод, 18 – объектив, 19 – фильтр, 20 – иллюминаторы, 21 – контроллер датчика, 22 – датчик давления и температуры, 24 – поглотитель лазерного излучения.
- Рис. 3.** Подводный флуориметр: а – прибор в сборе, б – прибор без корпуса.

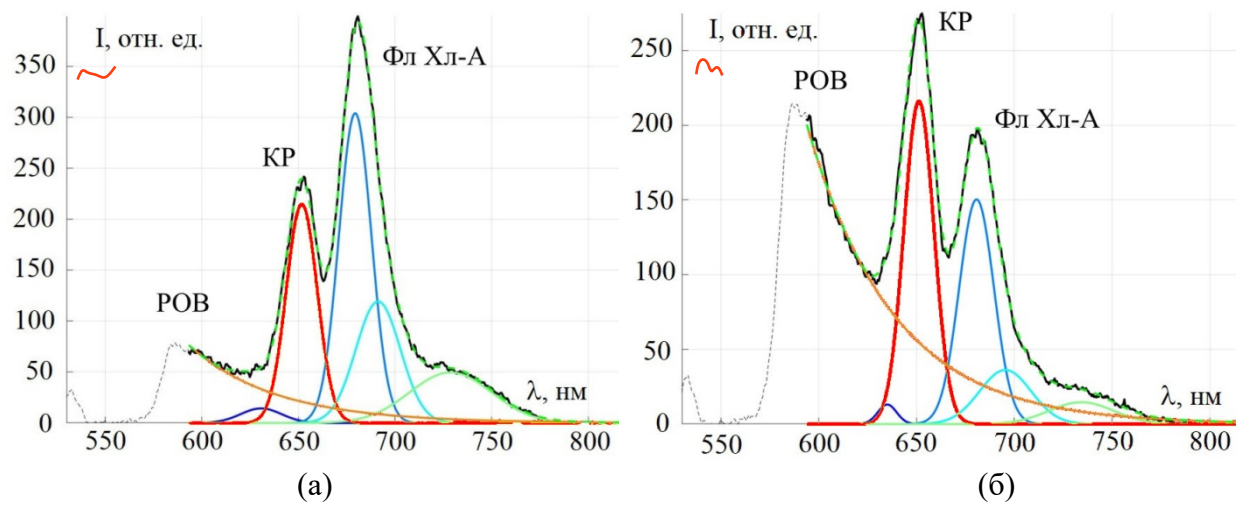
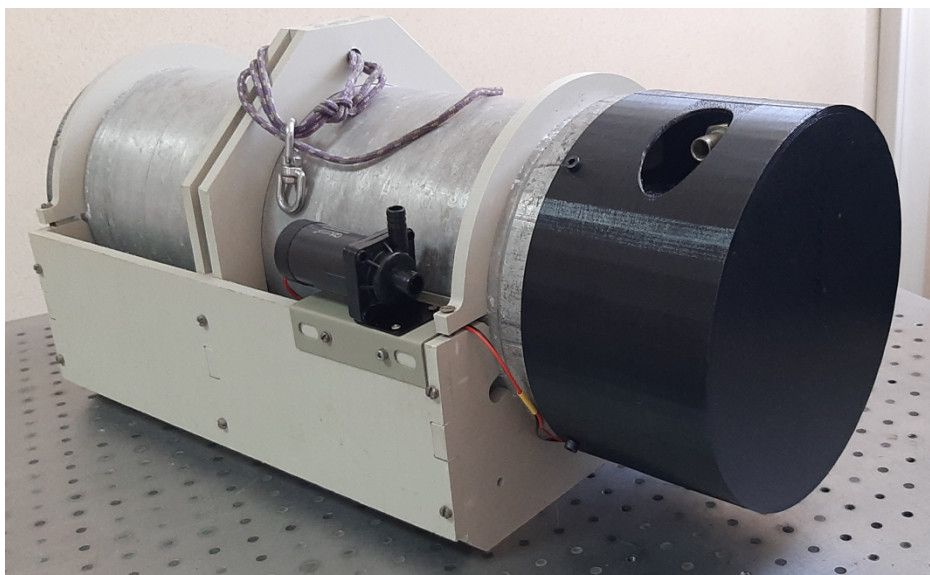
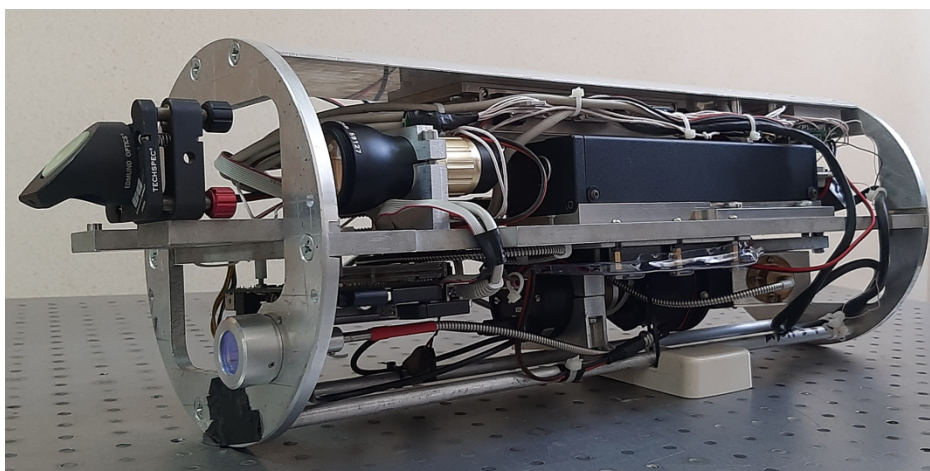


Рис. 1.



(a)



(б)

Рис. 3.