ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 681.785.45:551.46.08:621.865.8

МАЛОГАБАРИТНЫЙ ФЛУОРИМЕТР ДЛЯ АППАРАТОВ МОРСКОЙ РОБОТОТЕХНИКИ

©2027 г. Д. Ю. Прощенко [a,b], И. О. Букин [a], Д. А. Коровецкий [a], А. А. Чехленок [a], В. Ф. Юрчик [a], О. А. Букин [a,*]

[a]*Морской государственный университет им. адмирала Г.И. Невельского*

Россия, 690003, Владивосток, Верхнепортовая ул. 50а

[b]*Институт автоматики и процессов управления*

Дальневосточного отделения Российской академии наук

Россия, 690041, Владивосток, ул. Радио, 5

**E-mail: o_bukin@mail.ru*

Поступила в редакцию 03.10.2026

После доработки 16.10.2026

Принята к публикации 06.11.2026

Описан погружаемый малогабаритный спектрофлуориметр, разработанный для интеграции в бортовые комплексы морской робототехники и предназначенный для селективного контроля антропогенного загрязнения подводных акваторий растворенными нефтепродуктами и исследований воздействия загрязнений на фитопланктонное сообщество. В отличие от существующих авиационных и судовых систем, разработанный спектрометр осуществляет измерения непосредственно в толще воды. Для достоверной оценки экологического воздействия в приборе реализована двухчастотная гибридная оптическая схема: полупроводниковый лазерный диод KSK-303 (532 нм) применяется для возбуждения лазерно-индуцированной флуоресценции хлорофилла А и лабильной фракции растворенного органического вещества, а высокоэффективный светодиод ультрафиолетового диапазона (278 нм) – для селективного возбуждения индуцированной флуоресценции растворенных нефтепродуктов. Конструкция снабжена автоматическим турельным механизмом светофильтров и изолированным проточным модулем с принудительной циркуляцией среды для защиты от фоновой засветки. Приводятся результаты лабораторной градуировки прибора по растворам судового топлива различных сортов и результаты натурных испытаний в составе телеуправляемого необитаемого подводного аппарата.

Ключевые слова*:* лазерная индуцированная флуоресценция, необитаемый телеуправляемый подводный аппарат, растворенные нефтепродукты, хлорофилл А, растворенное органическое вещество, спектр флуоресценции.

1. ВВЕДЕНИЕ

Анализ экологического состояния морских акваторий и оценка антропогенного воздействия на состояние фитопланктонных сообществ требуют оперативного мониторинга ключевых биооптических параметров водной среды. К ним относятся концентрация хлорофилла А и концентрация растворенного органического вещества (РОВ) [1–3]. Однако в условиях растущей техногенной нагрузки этих параметров становится недостаточно. Растворенные нефтепродукты, в частности компоненты судового топлива, оказывают сложное и неоднозначное воздействие на морские экосистемы. В зависимости от концентрации и фракционного состава они могут как вызывать угнетение фотосинтетического аппарата микроводорослей вплоть до их гибели, так и, напротив, стимулировать развитие отдельных видов. Нелинейный характер этого отклика определяет необходимость детального исследования динамики состояния клеток фитопланктона под действием загрязнений, а эффективным инструментом для решения этой задачи является комбинированная методика измерений [4–7]. Это делает актуальной разработку аппаратуры нового поколения, способной решать задачу селективного разделения флуоресцентных вкладов РОВ естественного происхождения и техногенных растворенных нефтепродуктов непосредственно в водной толще. Ранее авторами были разработаны судовые и авиационные комплексы лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ), предназначенные для размещения на беспилотных воздушных судах и научно-исследовательских судах [8, 9]. Однако эти комплексы позволяют осуществлять дистанционный мониторинг только приповерхностного слоя воды, оставляя недоступными процессы переноса и трансформации загрязнений в объеме фотического слоя акватории.

Интеграция прецизионной оптической аппаратуры на мобильные подводные платформы (телеуправляемые и автономные необитаемые подводные аппараты) возможна только при кардинальном снижении массогабаритных характеристик и энергопотребления прибора и адаптации сопряженных оптических методов. Использование спектрометров, реализующих трехкомпонентную методику совместного анализа параметров лабильного РОВ (естественного происхождения), пигментных комплексов клеток фитопланктона и концентрации углеводородов растворенных нефтепродуктов, позволяет детектировать ранние стадии стресса и физиологические изменения в сообществах микроводорослей в зависимости от локальной концентрации растворенных фракций углеводородов. Это обуславливает необходимость создания погружных флуориметров, способных осуществлять измерения флуоресцентных вкладов РОВ, хлорофилла А и нефтепродуктов в режиме *in situ*.

В настоящей работе описываются конструкция, функциональная блок-схема, оптико-электронный блок и методика калибровки малогабаритного погружаемого двухчастотного флуориметра, использующего гибридную лазерно-светодиодную схему возбуждения и предназначенного для работы в составе бортового оборудования подводных робототехнических комплексов.

2. БЛОК-СХЕМА И ПРИНЦИП РАБОТЫ ФЛУОРИМЕТРА

Концепция измерительного комплекса предполагает регистрацию спектров индуцированной флуоресценции растворенных нефтепродуктов, а также лазерно-индуцированной флуоресценции растворенного органического вещества естественного происхождения (лабильного РОВ) и хлорофилла А. Оптико-электронный тракт прибора выполнен по двухканальной схеме с двумя раздельными источниками индуцирующего излучения, принципиальное разделение типов которых обусловлено физико-биологическими особенностями исследуемых объектов. На рис. 1 приведена блок-схема малогабаритного спектрометра, интегрированного на телеуправляемый необитаемый подводный аппарат (ТНПА) РБ-660D.

Первый канал ультрафиолетового (УФ) диапазона обеспечивает высокочувствительную регистрацию углеводородов нефти. Максимальный квантовый выход индуцированной флуоресценции (ИФ) растворенных нефтепродуктов в диапазоне 320–380 нм достигается при возбуждении излучением с длиной волны менее 300 нм. Развитие технологий полупроводниковых источников УФ-диапазона с высоким КПД позволило применить в УФ-канале прибора компактный светодиод. В качестве источника УФ-излучения выбран светодиод LEUVA66H70HF00 (LG) со следующими параметрами: центральная длина волны 277.7 нм, полуширина спектра излучения 11.4 нм, средняя мощность 70 мВт.

Рис. 1. Блок-схема малогабаритного спектрометра, интегрированного в ТНПА РБ-600

Обоснованием необходимости введения в оптическую схему прибора второго измерительного канала с длиной волны возбуждения 532 нм служит спектральная специфика исследуемых сред. Использование источников излучения с двумя различными длинами волн позволяет корректно разделить перекрывающиеся спектры флуоресценции растворенных в морской воде нефтепродуктов (эффективно возбуждаемых УФ-излучением на длине волны 287 нм) и нативного растворенного органического вещества (его лабильной фракции РОВ).

Применение излучения зеленой области спектра принципиально важно для прецизионного измерения флуоресценции хлорофилла А живых клеток фитопланктона. В отличие от жесткого УФ-излучения, которое вызывает фотоиндуцированный стресс, закрытие реакционных центров фотосистем может привести к деструкции и гибели клеток,

зондирование на длине волны 532 нм является щадящим для биообъектов. Более того, как показано в работе [10], квантовый выход лазерно-индуцированной флуоресценции хлорофилла А при возбуждении в зеленой области спектра выше по сравнению с таковым при ультрафиолетовом возбуждении, что обеспечивает дополнительное повышение чувствительности и точности измерений прибора.

Надводный модуль предназначен для обеспечения электропитания, информационного обмена и управления подводным комплексом, включающим ТНПА и интегрированную полезную нагрузку в виде двухчастотного погружного флуориметра. Данный модуль включает персональный компьютер оператора, два преобразователя питания, PLC-модем (Power Line Communication) и катушку с четырехжильным кабель-тросом. Персональный компьютер оператора (*1* на рис. 1) выполняет функции центрального средства управления подводным комплексом и визуализации поступающей информации. С его помощью осуществляются формирование управляющих команд для исполнительных систем ТНПА, контроль параметров его функционирования, а также управление режимами работы двухчастотного погружного флуориметра. ПК обеспечивает прием, обработку и отображение данных, поступающих от бортовых электронных систем ТНПА и полезной нагрузки. Его питает преобразователь питания AC–DC с входного напряжения 220 В на постоянное напряжение 12 В *2.2*. Преобразователь питания AC–DC *2.1* обеспечивает преобразование входного напряжения 220 В переменного тока в постоянное напряжение 400 В. Выходное напряжение данного преобразователя подается на токопроводящие жилы кабель-троса и передается по нему к подводной части комплекса, где в дальнейшем осуществляется его преобразование с помощью DC–DC-модулей *2.3* и *2.4* для питания бортового оборудования ТНПА и элементной базы полезной нагрузки. Повышенное напряжение передачи позволяет снизить ток в кабель-тросе и, соответственно, уменьшить потери мощности в его токопроводящих жилах.

Для организации информационного обмена между постом оператора и подводной частью комплекса применяется PLC-модем *3*. Устройство обеспечивает передачу цифровых данных по силовым жилам кабель-троса с использованием технологии PLC. Данная технология позволяет передавать информационные данные по электрическим цепям кабель-троса совместно с постоянным напряжением питания. На подводной части соответствующий PLC-модем выполняет обратное преобразование сигнала, обеспечивая получение данных бортовой системой управления ТНПА. В обратном направлении осуществляется передача телеметрической информации, результатов работы полезной нагрузки и других данных от подводного комплекса к операторскому компьютеру.

Для управления узлами измерительного комплекса используется одноплатный компьютер ITX-29 (*5*). Связь с ним с надводного пульта осуществляется посредством программы доступа к удаленному рабочему столу по Ethernet-интерфейсу. Для управления различными исполнительными элементами (включение или выключение излучения в каналах *1* или *2*, смена системы оптических фильтров *10,* изменение скорости потока в проточной системе *13* посредством формирования управляющего сигнала на регулятор скорости ESC *12* подводного бесколлекторного движителя) к ITX-29 по интерфейсу USB подключается отладочная плата на базе микроконтроллера ATmega328P.

В качестве приемной системы выбран малогабаритный высокочувствительный спектрометр *7* с рабочим диапазоном 250–800 нм, низким энергопотреблением, широким температурным интервалом эксплуатации и возможностью программного управления с помощью поставляемого SDK. Наиболее полно указанным требованиям удовлетворяют спектрометры Maya 2000 Pro (Ocean Insight) и ATP5200P (Optosky). Оба прибора выполнены по симметричной оптической схеме Черни–Тернера с использованием ПЗС-матрицы Hamamatsu (2048 пикселей). Однако в условиях размещения измерительной аппаратуры в замкнутом герметичном подводном блоке критически важным фактором становится минимизация температурного дрейфа характеристик приемника. Наличие встроенного модуля термоэлектрического охлаждения (TEC) в спектрометре ATP5200P позволяет стабилизировать температуру ПЗС-матрицы и нивелировать влияние внешнего температурного фона на результаты измерений. Это предопределило выбор модели ATP5200P для реализации регистрирующего тракта флуориметра [11]. Для повышения эффективности сбора оптического сигнала на входе регистрирующего канала установлен коллиматор 74-DA (Ocean Insight) с кварцевой оптикой и разъемом SMA 905.

Защита светочувствительной матрицы спектрометра от засветки зондирующим излучением обеспечивается системой отрезающих светофильтров. Для первого УФ-канала оптический фильтр должен подавлять упругое рассеяние в интервале 270–285 нм не менее чем на два порядка при коэффициенте пропускания в диапазоне 300–800 нм выше 80%. В качестве такого фильтра использована полиэтилентерефталатная (ПЭТ) пластина. Фильтрация излучения второго (видимого) канала требует подавления рассеянного лазерного излучения на длине волны 532 нм не менее чем на четыре порядка при пропускании в спектральной области 560–800 нм не менее 80%. Данное требование реализовано с помощью комбинации из двух светофильтров FGL550 (Thorlabs).

Поскольку приемный тракт является общим и регистрирует флуоресценцию как растворенных нефтепродуктов, так и хлорофилла, в приборе реализован турельный механизм с

сервоприводом *10* под управлением микроконтроллера. Устройство позволяет позиционировать необходимый светофильтр перед входной апертурой коллиматора в зависимости от текущего режима зондирования.

Оптические иллюминаторы *11* прибора выполнены из кварцевого стекла, обеспечивающего прозрачность в УФ-области спектра (длина волны менее 290 нм). Взаимная компоновка элементов комплекса выбрана таким образом, чтобы минимизировать длину оптического пути в морской воде для УФ-канала. Это необходимо для снижения влияния высокого коэффициента поглощения индуцирующего и регистрируемого излучения при повышенных концентрациях нефтепродуктов в исследуемой среде. Оптический канал возбуждения и регистрации для источника с длиной волны 532 нм реализован по продольной оптической схеме. Выбор данной геометрии обусловлен тем, что изотропный характер индикатрисы флуоресценции позволяет эффективно регистрировать обратное излучение непосредственно по оси зондирующего лазерного пучка.

При проведении натурных измерений на малых или средних глубинах (до 50 м) в солнечный день интенсивность проникающего солнечного света может на несколько порядков превышать интенсивность флуоресценции полезного сигнала в областях с крайне низкой концентрацией фитопланктона. При этом процесс регистрации с борта ТНПА может протекать при постоянно изменяющемся пространственном положении измерительного комплекса, что приводит к значительным флуктуациям фоновой интенсивности. Для слабых сигналов, требующих большого времени экспозиции, стандартное вычитание фонового спектра не позволяет решить проблему искажения результирующей спектральной картины. Полное же отсутствие фоновой засветки (работа на глубинах ниже фотического слоя, в темное время суток и т.д.) обусловливает необходимость включения внешнего освещения ТНПА, что также приводит к появлению паразитного излучения.

Для решения данной проблемы область приемного канала оснащена изолированным от внешнего освещения проточным модулем *13* с принудительной циркуляцией. В этой системе выделены полости для оптических путей канала *1* (излучение на длине волны 278 нм), канала *2* (на длине волны 532 нм) и канала приемной системы. В качестве источника принудительной циркуляции водного потока выступает малогабаритный бесколлекторный подводный движитель, управляемый посредством подачи сигналов с микроконтроллера на электронный регулятор хода (ESC) по сервосигналу на базе широтно-импульсной модуляции.

Процесс регистрации спектров флуоресценции морской воды заключается в следующем. Излучение светодиода и полупроводникового лазера через кварцевые иллюминаторы направляется в воду. Сигнал флуоресценции регистрируется спектрометром с помощью

коллиматора 74-DA (Ocean Optics). Фильтры используются для подавления упругого рассеяния. Измерения на разных длинах волн осуществляются поочередно.

В случае измерения спектра ЛИФ, возбуждаемого излучением с длиной волны 278 нм, излучает только УФ-светодиод. При этом перед объективом располагается фильтр в виде ПЭТ-пластины для подавления упругого рассеяния на длине волны 278 нм. При измерении спектра при возбуждении излучением с длиной волны 532 нм в канал регистрации с помощью сервопривода вводится фильтр, подавляющий излучение на этой длине волны.

Излучение, собранное объективом, направляется на входную щель спектрометра. Управление работой всего спектрометра и обработка спектров осуществляются с помощью одноплатного ПК и микроконтроллера. Спектрометр размещается в герметичном корпусе. Подключение к внешнему управляющему интерфейсу и питанию осуществляется через герморазъемы BH12M *14* (Subconn), позволяющие в любой момент отсоединить спектрометр от ТНПА и демонтировать устройство.

Возможность получения спектра ЛИФ при возбуждении в зеленой и УФ-областях спектра позволяет выполнять одновременный мониторинг загрязнения морской воды нефтепродуктами, измерять основные параметры, характеризующие состояние фотосинтезирующего аппарата клеток фитопланктона, а также оценивать воздействие процессов загрязнения на состояние фитопланктонного сообщества в исследуемой акватории.

На рис. 2 приведено изображение малогабаритного лазерно-светодиодного флуориметра для ТНПА без проточной системы.

Рис. 2. Малогабаритный лазерно-светодиодный спектрометр

3. КАЛИБРОВКА СПЕКТРОМЕТРА И МЕТОДИКА НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Калибровка измерений концентрации растворенных углеводородов нефтепродуктов проводилась в контролируемых лабораторных условиях путем последовательного погружения измерительного блока в технологическую емкость, содержащую рабочие растворы судового топлива различных марок (DMA, DMZ, RMB 30, RME 180, RMG 380) с заданными концентрациями.

В отличие от стандартных биооптических параметров водной среды, селективное определение растворенных антропогенных углеводородов с использованием метода индуцированной флуоресценции потребовало разработки и реализации оригинальной методики калибровки, так как вместо лазерного излучения использовалось широкополосное излучение полупроводникового светодиода. Методика проведения измерения концентрации растворенных углеводородов нефти в морской воде с использованием методики ЛИФ и проведение процедуры калибровок лазерных флуориметров на измерение концентрации растворенного в

морской воде судового топлива подробно описаны в работе [12]. Градуировка спектрометра выполнялась в лабораторных условиях для серий растворов судового топлива в воде. Измерения проводились при отсутствии внешнего фона, при этом учитывались собственный спектральный фон и флуктуационные шумы регистрирующей системы.

Предварительно концентрация растворов определялась по стандартной методике с использованием фурье-спектрометрии в ИК-диапазоне [13]. На рис. 3 приведены спектры флуоресценции растворов дизельного топлива с различными значениями концентрации в морской воде при возбуждении УФ-излучением. Для проведения последующей калибровки был введен интегральный параметр α, который рассчитывается на основе полученных спектральных данных по формуле:

$$\alpha = \int_{300}^{525} \big(I(\lambda) - I_0(\lambda)\big)\, d\lambda, \qquad (1)$$

где $I(\lambda)$ – интенсивность сигнала флуоресценции морской воды с раствором топлива на длине волны λ, $I_0(\lambda)$ – интенсивность сигнала флуоресценции морской воды без раствора нефтепродуктов на длине волны λ. Затем этот параметр приводился в соответствие (калибровался) с концентрацией судового топлива, определенной с использованием стандартного метода фурье-спектроскопии в ИК-диапазоне.

Рис. 3. Нормированные на интенсивность излучения светодиода спектры ЛИФ дизельного судового топлива DMA с различными значениями концентрации в морской воде

Экспериментально установленная калибровочная зависимость между концентрацией раствора и параметром α приведена на рис. 4.

Рис. 4. Калибровочная зависимость

Калибровочная зависимость была использована для определения значения предела обнаружения (минимально обнаружимой концентрации, LoD) растворов нефтепродуктов для разработанного спектрометра. Расчет проводился на основе стандартного критерия ИЮПАК (IUPAC) 3σ-метода [14]:

$$\mathrm{LoD} = 3\sigma / S, \qquad (2)$$

где σ – среднеквадратичное отклонение интенсивности спектрального фона (шума холостой пробы), измеренное на длине волны регистрации флуоресценции, S – чувствительность определения (тангенс угла наклона) линейного участка калибровочной прямой.

Данный критерий является общепринятым метрологическим стандартом в аналитической спектроскопии, гарантирующим достоверность обнаружения сигнала на фоне шумов с доверительной вероятностью около 99.7%. Значения LoD, полученные для различных сортов судового топлива, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Значения LoD для различных сортов судового топлива

Типы образцов	LoD, ppm
DMA	0.1
DMZ	1.1
RMB 30	0.3
RME 180	0.2
RMG 380	0.1
Дизельное топливо	0.7
Сырая нефть	0.1
Керосин	2.4

Физические принципы регистрации флуоресценции пигментного комплекса фитопланктона и растворенного органического вещества естественного происхождения при лазерном возбуждении фундаментально изучены и детально описаны в литературе [15–17], поэтому специализированная калибровка этих параметров в лабораторных условиях не проводилась. Вместо этого калибровка измерительных каналов хлорофилла А и РОВ для разработанного прибора осуществлялась непосредственно в процессе проведения натурных гидрофизических измерений методом сравнительной интеркалибрации.

На рис. 5 изображены проведения измерений на спектрофлуориметре в приповерхностном слое с использованием ТНПА типа РБ-660D.

Рис. 5. Возбуждение флуоресценции: **а** – лазерным излучением

Одновременно с измерениями биооптических параметров морской воды на разработанном погружном флуориметре проводились измерения концентрации хлорофилла А и РОВ (в отсутствие антропогенных загрязнений) стандартными коммерческими погружными флуориметрами. Позиционирование датчиков обеспечивало проведение измерений из единого объема. На основе массивов данных, полученных в точках со стабильными гидрооптическими характеристиками и в отсутствие загрязнений нефтепродуктами, проводилось прямое сравнение интенсивностей нормированных значений показаний спектрометра и абсолютных значений концентраций, полученных стандартными датчиками. По результатам анализа определялись калибровочные коэффициенты пересчета для каналов погружаемого спектрометра.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена разработка малогабаритного погружаемого спектрометра, предназначенного для мониторинга морских акваторий с использованием подводной робототехники (в частности,

ТНПА типа РБ-660D). Реализована двухканальная схема возбуждения на базе компактных полупроводниковых источников излучения (УФ-светодиод с длиной волны 278 нм и лазер с длиной волны 532 нм). Применение общего регистрирующего тракта на базе спектрометра ATP5200P (оснащенного термоэлектрическим охлаждением) совместно с автоматическим турельным механизмом светофильтров позволило кардинально снизить энергопотребление и массогабаритные характеристики прибора при сохранении высокого спектрального разрешения (0.6 нм).

Разработана и апробирована методика лабораторной калибровки каналов индуцированной флуоресценции на базе широкополосного УФ-светодиода. Введение нормировки интенсивности регистрируемых сигналов на мощность излучения источника и расчет безразмерного интегрального параметра α в интервале 300–525 нм обеспечили линеаризацию аналитического отклика относительно эталонных данных фурье-спектрометрии в ИК-диапазоне. Минимальный предел обнаружения растворенных сортов судовых топлив находится в диапазоне от 0.1 до 2 ppm.

Интеграция разработанного флуориметра в бортовую сеть ТНПА по интерфейсу Ethernet позволила в режиме удаленного рабочего стола проводить непрерывный одновременный контроль как антропогенных фракций углеводородов, так и естественных биооптических параметров среды, не оказывая деструктивного воздействия на фотосинтетический аппарат фитопланктона. Созданный комплекс перспективен для решения задач оперативного экологического картирования и обнаружения утечек судового топлива непосредственно в толще воды, а также для проведения научных исследований воздействия загрязнений морских акваторий растворенными нефтепродуктами на состояние фотосинтезирующего аппарата фитопланктонных сообществ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sun Y., Wang D., Li L. et al.* Water Research. 2024. V. 267. P. 122546. 10.1016/j.watres.2024.122546
2. *Favareto L., Rudorff N., Brotas, V.* et al. Remote Sensing. 2024. V. 16. №. 18. P. 3440. https://doi.org/10.3390/rs16183440
3. *Zhou Z.* Int. J. Adv. Eng. Technol. Res. 2026. V. 3. №. 1. P. 21-26. 10.54097/pk2tda35
4. *Huang Y.J., Jiang Z.B., Zeng J.N. et al.* Environ. Monit. Assess. 2011. V. 176. P. 517. https://doi.org/10.1007/s10661-010-1601-6

5. *Quigg A., Parsons M., Bargu S. et al.* Mar. Pollut. Bull. 2021. V. 165. P. 112074. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112074
6. *Мошарова И.В. Ильинский В.В., Маторин Д.Н., Мошаров С.А., Акулова А.Ю., Протопопов Ф.Ф.* Микробиология. 2015. Т. 84. № 6. С. 712. https://doi.org/10.7868/S0026365615060075
7. *Пуговкин Д.В., Воскобойников Г.М.* Морской биологический журнал. 2018. Т. 3. № 4. С. 76. https://elibrary.ru/item.asp?id=36775932
8. *Букин О.А., Салюк П.А., Майор А.Ю., Павлов А.Н.* Оптика атмосферы и океана. 2005. Т. 18. № 11. С. 976. https://elibrary.ru/item.asp?id=9120878
9. *Bukin O., Proschenko D., Korovetskiy D., Chekhlenok A., Yurchik V., Bukin I.* Appl. Sci. 2021. V. 11. № 8. P. 3642. https://doi.org/10.3390/app11083642
10. *Букин О.А., Голик С.С., Салюк П.А., Бауло Е.Н., Ластовская И.А.* Журнал прикладной спектроскопии. 2008. Т. 75. № 2. С. 224. https://elibrary.ru/item.asp?id=9911991 [*Bukin O.A., Golik S.S., Salyuk P.A., Lastovskaya I.A., Baulo E.N.* J. Appl. Spectrosc. 2008. V. 75. № 2. P. 231].
11. ATP5200P/ATP5020P Series High Performance Cooled Spectrometer. Datasheet. Optosky (Xiamen) Photonics Inc. URL: https://optosky.com
12. *Bukin O., Proschenko D., Chekhlenok A. et al.* Photonics. 2020. V. 7. № 2. P. 36. https://doi.org/10.3390/photonics7020036
13. ГОСТ Р 51797-2001. Вода питьевая. Метод определения содержания нефтепродуктов. М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.
14. Nomenclature, symbols, units and their usage in spectrochemical analysis – II. Data processing, Pure Appl. Chem. 1976. V. 45. № 2. P. 99.
15. *Карабашев Г.С., Ханаев С.А.* Лазерный проточный флуориметр. Океанология. 1987. Т. 27. № 6. С. 1007.
16. *Фадеев В.В., Чекалюк А.М., Чубаров В.В.* Доклады Академии наук СССР. 1982. Т. 262. № 2. С. 338. https://www.mathnet.ru/rus/dan44999
17. *Демидов А.А., Баулин Е.В., Фадеев В.В., Шур Л.А.* Океанология. 1981. Т. 21. № 1. С. 174.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Блок-схема малогабаритного спектрометра, интегрированного в ТНПА РБ-600: *1* – ПК оператора, *2* – преобразователи питания, *3* – PLC-модем, *4* – четырехжильный кабель-трос с катушкой, *5* – одноплатный компьютер ITX-29, *6* – микроконтроллер, *7* – спектрометр, *8* – лазер KSK-303, *9* – ультрафиолетовый диод LEUVA66H70HF00, *10* – кассета со светофильтрами, *11* – кварцевые иллюминаторы, *12* – регулятор скорости, *13* – проточная система, *14* – герморазъемы

Рис. 2. Малогабаритный лазерно-светодиодный спектрометр

Рис. 3. Нормированные на интенсивность излучения светодиода спектры ЛИФ дизельного судового топлива DMA с различными значениями концентрации в морской воде

Рис. 4. Калибровочная зависимость между концентрацией раствора и интегральным параметром α

Рис. 5. Возбуждение флуоресценции: **а** – лазерным излучением в зеленой области спектра, **б** – УФ-излучением

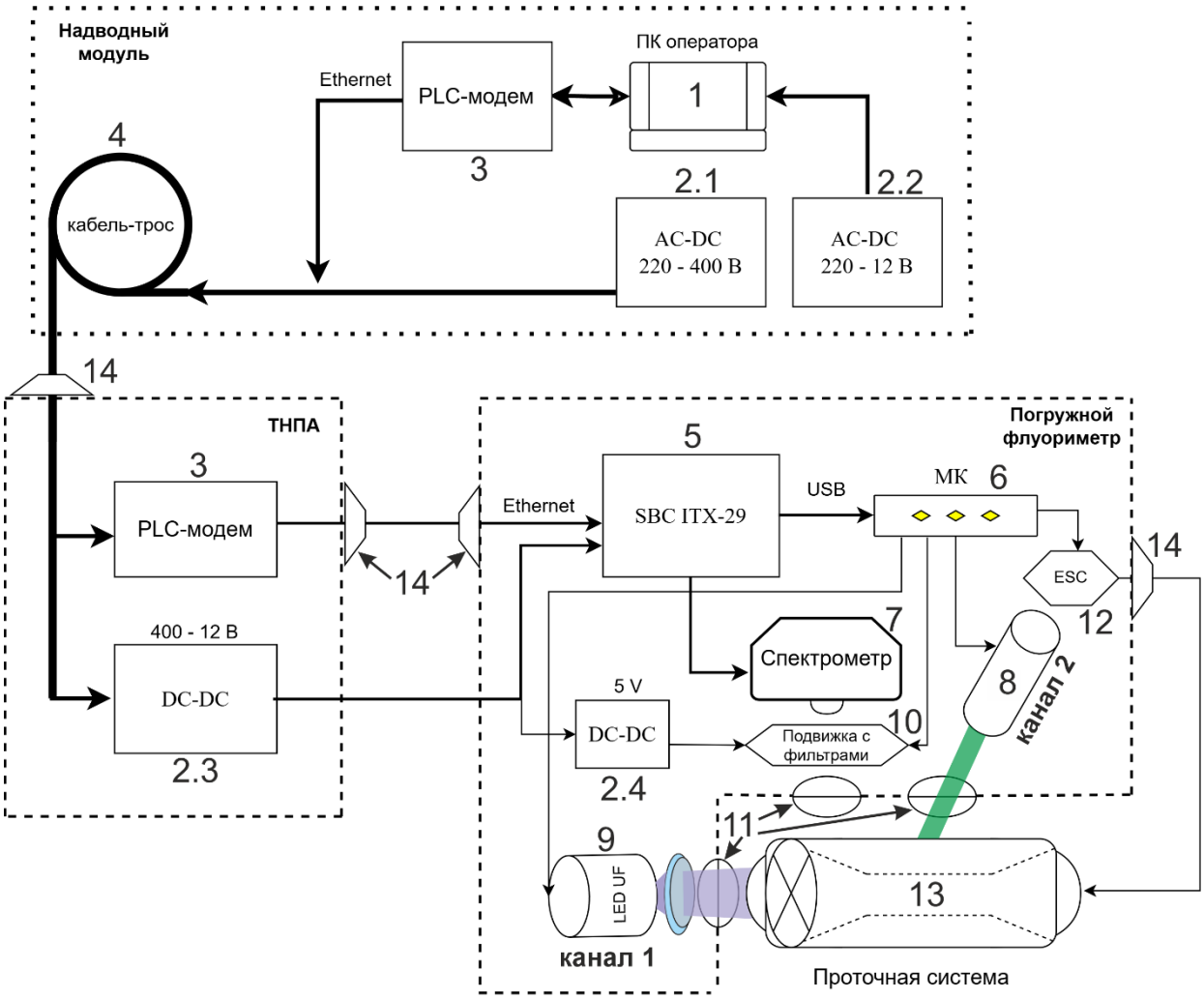

Надводный модуль
Ethernet
PLC-модем
ПК оператора
1
3
4
кабель-трос
2.1
2.2
AC-DC 220 - 400 В
AC-DC 220 - 12 В
14
ТНПА
3
PLC-модем
400 - 12 В
DC-DC
2.3
14
Погружной флуориметр
5
Ethernet
SBC ITX-29
USB
МК 6
ESC
14
12
7
Спектрометр
8
канал 2
5 V
DC-DC
2.4
Подвижка с фильтрами
10
11
9
LED UF
13
канал 1
Проточная система

Рис. 1.

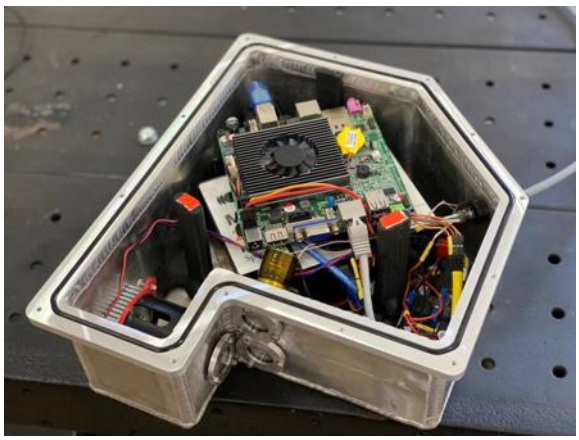


Рис. 2.

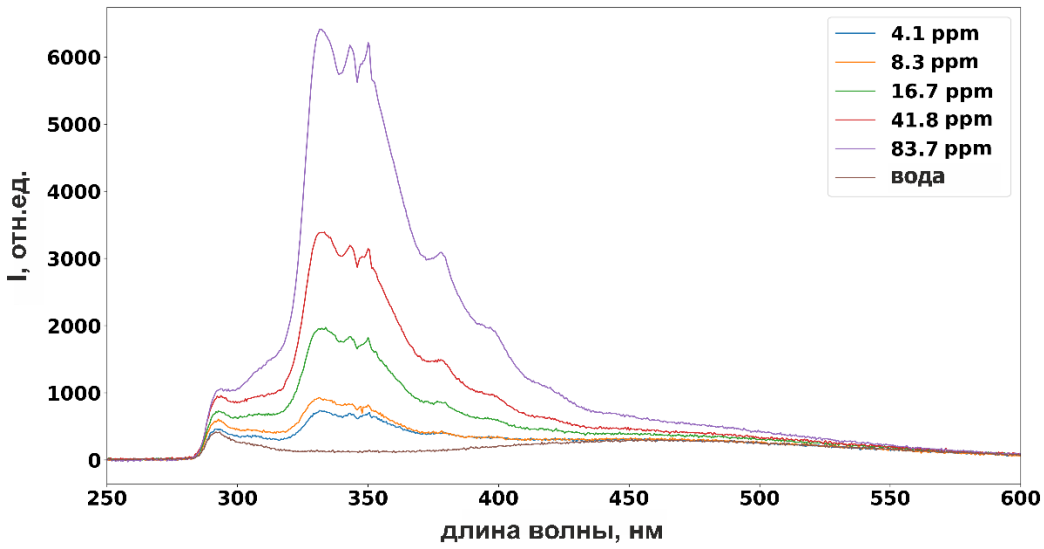

4.1 ppm
8.3 ppm
16.7 ppm
41.8 ppm
83.7 ppm
вода
I, отн.ед.
0
1000
2000
3000
4000
5000
6000
250
300
350
400
450
500
550
600
длина волны, нм

Рис. 3.

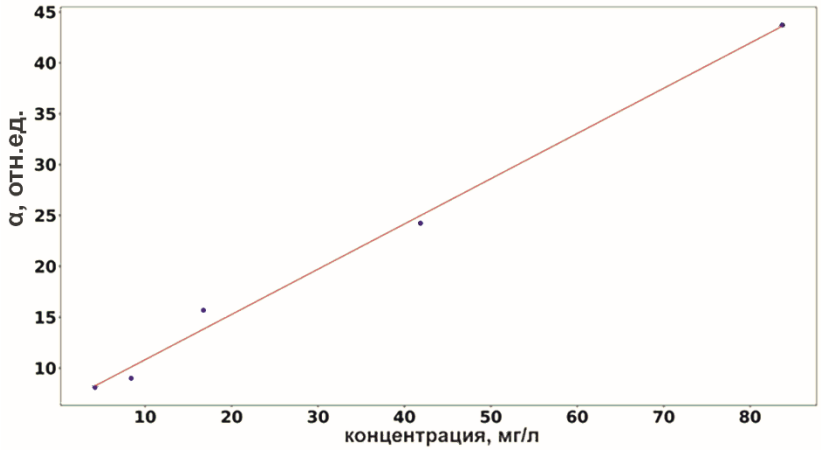
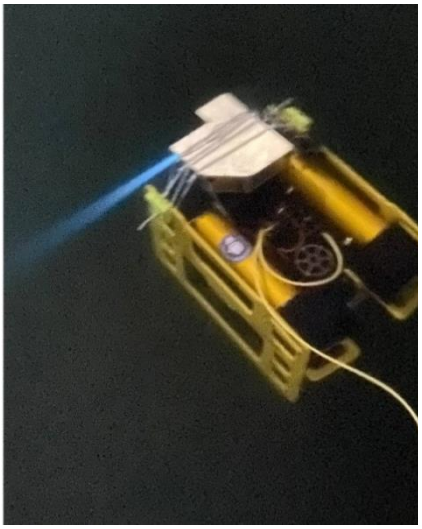

α, отн.ед.
45
40
35
30
25
20
15
10
10
20
30
40
50
60
70
80
концентрация, мг/л

Рис.4.



(а)



(б).

Рис. 5.