

ЭЛЕМЕНТЫ ЛАЗЕРНОЙ СЕНСОРИКИ В ПОДВОДНОЙ РОБОТОТЕХНИКЕ

**О.А. Букин¹, А.Ю. Майор², Д.Ю. Прощенко¹,
И.О. Букин¹, С.А. Мун¹, Д.Г. Ляхов³,
А.А. Чехленок¹, В.В. Болотов¹, Д.В. Буров¹**

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Морской государственный университет им. Г.И. Невельского¹
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН²
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем морских технологий ДВО РАН³

В работе анализируются возможности, которые представляют лазерные технологии для разработки сенсорных элементов подводных роботов и результаты последних разработок в области подводной робототехники для реализации методов лазерной спектроскопии в целях мониторинга подводных сред. Сделан обзор основных направлений использования лазерных сенсоров в подводной робототехнике. Подробно рассмотрены перспективы использования спектроскопии лазерной индуцированной флуоресценции (ЛИФ) и лазерной искровой спектроскопии (ЛИС) для разработки элементов сенсорики подводной робототехники. Представлены основные технические характеристики и результаты разработки погружного модуля лазерного спектрометра, предназначенного для исследования спектров комбинационного рассеяния и лазерной индуцированной флуоресценции. Спектрометр разрабатывался как элемент сенсорики телеуправляемого необитаемого подводного аппарата, обеспечивающий возможность дистанционного обнаружения и измерения концентрации органических веществ, находящихся в морской воде и подводных объектах в различных формах. Описаны результаты натурных испытаний погружаемого спектрометра ЛИФ, которые проводились на различных морских акваториях, включая Арктику. Параметры лазерного спектрометра позволяют использовать его на телеуправляемом необитаемом аппарате обследовательского класса. На основании опыта разработки лазерного спектрометра и ТНПА, обеспечивающего работу спектрометра, сформулированы основные направления дальнейшей разработки сенсорных элементов, обеспечивающих дистанционную ЛИФ- и ЛИС-сенсорику.

1. Введение. Обзор лазерных сенсоров в подводной робототехнике

Эффективность использования подводной робототехники во многом определяется уровнем её технического оснащения для обследования акваторий или проведения подводных работ. Важной частью этого оснащения является сенсорики, т.е. совокупность устройств (сенсоров), преобразующих информацию о внешней среде в измеряемые сигналы (в категорию сенсорики включается и способность осуществлять обмен информацией с другими подводными объектами посредством создания каналов акустической или лазерной связи).

В последние годы наблюдается значительный прогресс в раз-

работке тактильной чувствительности роботов: манипуляторы оснащаются контактными сенсорами, измеряющими температуру, давление, жёсткость подводных объектов, скорости течений и т.д. Тактильная чувствительность подводных роботов представлена, как правило, контактными датчиками. Такие сенсоры хорошо отработаны и достаточно представлены на рынке подводной робототехники [1, 2]. Более высокий технический уровень сенсорики представляют устройства, обеспечивающие дистанционное измерение параметров подводных сред и объектов. Эти сенсоры основаны на акустических и оптических методах измерений параметров окружающей среды. Несмотря на то что оптические методы в подводной

среде значительно «проигрывают» акустике в дальности, они позволяют определять характеристики, которые недоступны акустическим методам. Техническая реализация лазерной сенсорики – это аппаратно-программные комплексы, которые обеспечивают количественные измерения параметров окружающей подводной среды, возможность ориентироваться в ней или возможность передавать информацию с использованием лазерных технологий.

Можно выделить несколько направлений разработки оптических

¹ 690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а. E-mail: o_bukin@mail.ru; dima.prsk@mail.ru

² 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5. E-mail: mayor@iacp.dvo.ru

³ 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а. E-mail: lyakhov@marine.febras.ru

(лазерных) сенсоров, где на данный момент наблюдается значительная активность разработчиков подводной робототехники. Прежде всего это элементы для измерения расстояния, размеров и формы подводных объектов [3], лазерные элементы, осуществляющие подводную связь между роботами [4], лазерные спектрометры для измерения концентрации элементного состава подводных объектов и органических веществ, содержащихся в морской воде в различных состояниях и формах [5]. Готовые решения устанавливаются как на телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА), так и на автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) различных производителей.

К настоящему времени существуют законченные разработки лазерных элементов для измерения расстояний между подводными объектами, определения их размеров и проведения лазерного сканирования поверхностей подводных объектов, что нашло применение, в частности, для изучения морской биоты [6]. Лазерное сканирование используется и для дефектоскопии различных подводных объектов и сооружений. Обеспечивается возможность сканирования объектов с расстояния от нескольких сантиметров до десятков метров от подводного аппарата, при этом достигается максимальное пространственное разрешение до долей миллиметра. В качестве примера можно привести съемку с дистанции 2 м античной амфоры на борту затопленного судна в Эгейском море [7].

Проблема организации высокоскоростного лазерного канала связи между подводными объектами находится в стадии разработок. Авторам известны только две компании, которые уже предлагают готовые технические решения

[8, 9]. В самых последних разработках предлагаются оптоакустические модемы, которые совмещают возможность акустического канала передачи информации на длинных дистанциях между подводными объектами и его способность корректировки их взаимного пространственного положения для организации лазерного подводного канала связи с высокой скоростью передачи данных [10, 11]. Подобный тип связи особенно полезен для передачи информации между подвижными подводными объектами как для случая связи подводного аппарата со стационарными донными станциями, так и в сетевом варианте использования.

Перспективным направлением разработок является создание лазерных элементов сенсорики, основанных на методе лазерной искровой спектроскопии (ЛИС) [12, 13]. Метод ЛИС, основанный на принципах генерации лазерной плазмы как источника возбуждения атомных и молекулярных эмиссионных спектров, получил широкое распространение благодаря достижениям в области лазерной техники и спектральных приборов. На данный момент метод ЛИС применяется практически во всех областях, где необходимо оперативное и точное определение химического состава различных объектов: элементный анализ жидкостей, газов, аэрозолей и твердых тел; обнаружение следовых компонент загрязнителей воды, почвы и воздуха; видовой отбор биологических материалов, включая семена и бактерии; обнаружение взрывчатых веществ, а также компонент химического и биологического оружия, ядерных отходов [14]. Стоит отметить, что на аппарате Curiosity, доставленном на поверхность Марса в августе 2012 года, используется инструмент ChemCam

[15], основанный непосредственно на методе лазерной искровой эмиссионной спектроскопии. На основании полученных спектрометрических измерений были получены данные о наличии следов воды на поверхности красной планеты [16, 17]. В свою очередь, на данный момент существуют лишь примеры лабораторных исследований и единичных вариантов установок и пробоотборников, предназначенных для проведения измерений химического состава подводных объектов методом лазерной искровой спектроскопии. При этом идеи реализации метода ЛИС в подводной среде высказывались еще в 90-х годах прошлого столетия. Впервые генерация лазерной искры и получение спектров непосредственно в объеме морской воды были осуществлены в работе [18]. Из последних подобных работ можно выделить работу [19], где исследуются спектры ЛИС в морской воде. Позднее, в 2014 году, этим же коллективом были проведены лабораторные исследования особенностей возникновения лазерной искры и формирующихся эмиссионных спектров в объеме морской воды в зависимости от величины давления при накачке замкнутого резервуара углекислым газом и азотом [20]. Эти эксперименты позволили смитировать процессы генерации плазмы и регистрации ее эмиссионных спектров при возбуждении наносекундными лазерными импульсами на длине волны 1064 нм в глубоководных слоях океана.

Впервые натурные испытания по изучению химического состава морской воды и минеральных отложений с использованием лазерных спектрометров, установленных на ТНПА, на глубинах свыше 1000 м были проведены с помощью модуля ChemiCam группой специалистов Токийско-

го университета [21]. Данные исследования продемонстрировали эффективность использования метода ЛИС для непосредственного бесконтактного исследования химического состава различных подводных объектов и хорошо согласовались с ранее полученными результатами.

На основе метода лазерной индуцированной флуоресценции (ЛИФ) возможно реализовать устройство, с помощью которого можно производить не только измерение концентрации хлорофилла А и растворённого органического вещества, воспроизводимого клетками фитопланктона, но и оценивать состояния фитопланктонных сообществ, определяя общий уровень биологической продуктивности водной среды в отношении воспроизводства растворённого органического вещества [22] или использовать анализ спектров ЛИФ от клеток фитопланктона в задачах мониторинга воздействия различных процессов на морские экосистемы [23]. В этом случае фитопланктон используется как естественный природный индикатор благодаря его высокой чувствительности к различным изменениям в окружающей среде – присутствию загрязнителей, климатическим изменениям, изменению светового режима и т.п. [24]. С помощью данного метода возможна регистрация углеводородов, находящихся на глубине в различных состояниях (растворённые углеводороды нефти, газогидраты), что позволит использовать ЛИФ-сенсоры для контроля подводных нефте- и газопроводов.

Метод ЛИФ широко используется для проведения натурных измерений с самых различных носителей. Однако известны единичные случаи использования спектрометров ЛИФ для исследо-

вания подводной среды с применением ТНПА или АНПА. Впервые в 1998 г. спектрометр ЛИФ был установлен на АНПА для проведения испытаний по использованию лазерной спектроскопии в целях экологического мониторинга подводной среды [25]. Многолетние разработки лазерных спектрометров привели к созданию и испытанию в 2002 году первого образца спектрометра из серии DORISS (Deep Ocean In Situ Spectrometer) [26]. Дальнейшие модификации спектрометров позволили значительно улучшить их характеристики и осуществлять исследования газогидратов до глубин порядка 6000 м, однако по-прежнему на ТНПА рабочего класса (типа «VENTANA») [27]. Применение подобных подводных аппаратов обуславливает высокую стоимость проведения исследований и сдерживает использование этих спектрометров для глубоководных измерений. Поэтому разработка малогабаритных спектрометров ЛИФ, которые не требуют значительных энергетических источников и могут использоваться на ТНПА обследовательского класса, представляется актуальной задачей на сегодняшний день.

2. Техническая реализация сенсорики ЛИФ для ТНПА

В конечном варианте разработки элемент ЛИФ сенсорики для ТНПА должен обеспечить измерение концентрации хлорофилла А (Б и С) и растворённого в морской воде органического вещества (РОВ) естественного происхождения (т.е. возникшего в результате процессов жизнедеятельности различных биологических объектов в океане, в большей части в результате жизнедеятельности фитопланктона), детектировать наличие растворённых в морской воде углеводородов нефти и проводить

оценку их концентрации, обеспечить регистрацию линий комбинационного рассеяния воды и газогидратов. Оптимальный вариант – это использование коротковолнового излучения для возбуждения спектров ЛИФ и комбинационного рассеяния (например, 4-й гармоники Nd: YAG с длиной волны 266 нм). В этом случае можно удовлетворительно разделить участки спектра ЛИФ, которые соответствуют растворённым углеводородам нефти, РОВ и флуоресценции хлорофиллов. Более того, можно решать задачу идентификации углеводородов нефти [28]. Наличие в морской воде сильного поглощения коротковолнового излучения значительно ограничивает использование УФ излучения. В нашем варианте подводного спектрометра ЛИФ мы не ставили задачу проведения идентификации различных сортов нефти и нефтепродуктов, а ограничились задачей измерения концентрации РОВ, хлорофилла А, линий комбинационного рассеяния и использовали более длинноволновое лазерное излучение. Существенным при выборе лазера является требование минимизации массо-габаритных параметров аппаратуры, входящей в состав ЛИФ сенсора. При этом требуется сохранить значения минимально-обнаружимых концентраций хлорофилла А и РОВ на уровне 1 мкг/л. Лабораторные эксперименты и оценки значений отношения сигнала к шуму для выделяемых спектральных участков позволили выбрать наиболее оптимальный твердотельный лазер YLF: Nd³⁺. Такой излучатель позволил нам использовать разработанные ранее методики обработки спектров ЛИФ для измерения концентраций и оценки темпов воспроизводства РОВ клетками фитопланктона по анализу параметров Q-C диаграмм [29].

Для того чтобы получить корректную информацию о концентрации РОВ и хлорофилла А, а также обеспечить возможность использования методик Q-C диаграмм, необходимо провести восстановление спектрального распределения интенсивности флуоресценции в диапазоне от возбуждающей длины волны до длинноволновой области флуоресценции хлорофилла. В нашем случае это спектральный интервал от возбуждающей длины волны до длин волн порядка 750 нм, в который входят анализируемые спектральные интервалы длинноволновой флуоресценции РОВ (от 530 нм до 750 нм), линия комбинационного рассеяния воды с максимумом на длине волны 645 нм и линия флуоресценции хлорофилла А с максимумом на длине волны 675 нм (для некоторых акваторий северо-западной части Тихого океана наблюдались дополнительные максимумы флуоресценции в длинноволновой области, соответствующие линии флуоресценции хлорофилла Б).

Определение концентрации хлорофилла А (С) основано на ее линейной пропорциональности отношения интенсивности линии

флуоресценции хлорофилла А ($I_{\text{ХлА}}$) к интенсивности комбинационного рассеяния морской воды ($I_{\text{кр}}$):

$$C = k \cdot I_{X_{NA}} / I_{kp}, \quad (1)$$

где k – коэффициент пропорциональности, определяемый в процессе калибровки метода.

В нашем случае концентрация хлорофилла А измерялась по интегральной интенсивности линии флуоресценции, нормированной на интегральную интенсивность линии КР воды. Методика измерения концентрации хлорофилла А, соответствующая обработка спектральных линий и калибровка описаны в работе [30].

Концентрация РОВ определялась подобным образом, на основе лабораторных калибровок, выполненных для проб морской воды. В результате калибровки получались регрессионные соотношения между интегральными интенсивностями широкополосной флуоресценции РОВ, нормированной на интегральную интенсивность линии КР воды, и значениями концентрации РОВ, полученными стандартными методами в отобранных пробах. Анализ соотношений параметров спектра РОВ с концентрациями РОВ и основные подходы к калибровке спек-

ров ЛИФ для измерения концентрации флуоресцирующей части РОВ приведены в работе [30]. Необходимо отметить, что разработка калибровочных методов для измерения концентрации РОВ и растворённых углеводородов нефти требует проведения дополнительных исследований. В этой части измерения, проводимые *in situ* в реальных подводных средах, с использованием спектрометра ЛИФ значительно расширят возможности проведения калибровок на реальные значения концентраций РОВ и растворённых в морской воде нефтепродуктов.

Блок-схема разработанного подводного модуля аппаратно-программного комплекса (АПК) спектрометра ЛИФ представлена на рис. 1.

В качестве излучателя использовался непрерывный лазер с диодной накачкой DTL-413, с длиной волны излучения 527 нм, средняя мощность излучения 200 мВт. Для возможности регистрации спектров флуоресценции и комбинационного рассеяния морской воды на глубинах до 300 метров спектральный модуль помещался в герметичный контейнер, оснащённый тремя кварцевыми иллюминаторами диаметром

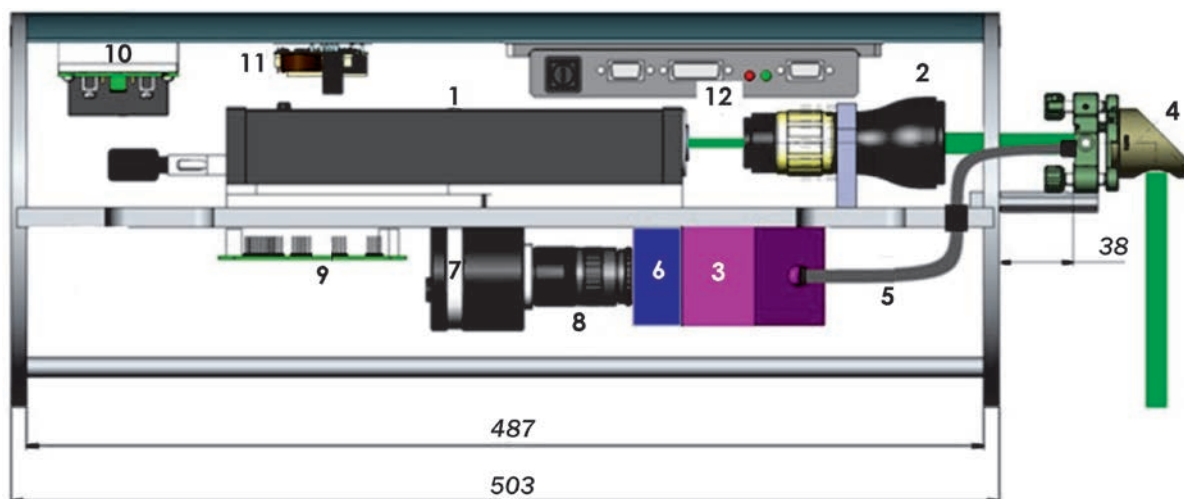


Рис. 1. Схема подводного лазерного флуориметра (световод настроен на приём обратно-рассеянного излучения)

50 мм. Через один осуществлялся вывод лазерного излучения, через два остальных – приём рассеянного излучения в обратном направлении и под углом 90° соответственно. Излучение лазера (1) направляется на коллиматор (2) с кратностью расширения луча (10). Далее излучение выводится в водную среду. Лазерное излучение индуцирует флуоресценцию морской воды, регистрируемую спектрометром (3) с помощью поворотного (4) и многоканального световодов (5). Обратнорассеянное излучение, соответствующее упругому рассеянию на длине волны 527 нм, подавлялось системой светофильтров, расположенных на входе световода (5). Конструкция герметичного корпуса устроена таким образом, что приём рассеянного лазерного излучения мог осуществляться в двух направлениях: в обратном, как показано на рис. 1, или под углом 90° , через иллюминатор в торцевой крышке герметичного контейнера. Картина спектрального распределения интенсивности флуоресценции, полученная на выходной щели спектрометра (3), усиливалась с помощью электронно-оптического преобразователя (6) и регистрировалась ПЗС-

камерой Видеоскан-285 USB (7) с объективом (8). Для управления и обработки полученных данных использовалась процессорная плата ITX-N29 (9). Внутренняя часть аппаратно-программного комплекса и АПК, помещённого в герметичный контейнер, представлены на рисунке 2, а, б.

Герметичный контейнер флуориметра представляет собой цилиндр с внутренним диаметром 200 мм и двумя торцевыми крышками. На задней крышке корпуса крепится герморазъём, на передней – 2 иллюминатора: для зондирующего излучения и приёма обратнорассеянного излучения, а также иллюминатор для регистрации рассеяния под углом 90° . В корпусе размещены две металлические плиты для установки оборудования. Верхняя – полукруглого сечения, выполняет функцию радиатора и предназначена для установки наиболее тепловыделяющих компонентов флуориметра: преобразователей напряжения и блока питания лазера. На нижней плите с обеих сторон располагаются остальные компоненты. Вес полностью смонтированного комплекса составил порядка 7 кг. Для проведения измерений биооптических параметров морской воды

и управления параметрами информационно-измерительной системы было создано единое программное обеспечение (ПО). ПО комплекса управляет всеми основными элементами установки, такими как включение-выключение лазера и электронно-оптического преобразователя, регулировка мощности выходного излучения, выбор экспозиции и усиления камеры. В реальном времени считываются параметры температуры основных тепловыделяющих элементов устройства, передается изображение с камеры, контролируется герметичность корпуса на предмет затекания, а также происходит предварительная статистическая обработка спектров по последним 10 кадрам.

В качестве аппарата-носителя был разработан совместно с ИПМТ ДВО РАН и реализован малогабаритный ТНПА МАКС-300 [31]. Питание и управление элементами спектрометра осуществлялось через каналы связи и питания ТНПА. На судне находится надводный пульт управления (НПУ), который запитывается от судовой сети переменного тока напряжением 220 В, 50 Гц. УЗО – устройство защитного отключения предназначено для предотвра-

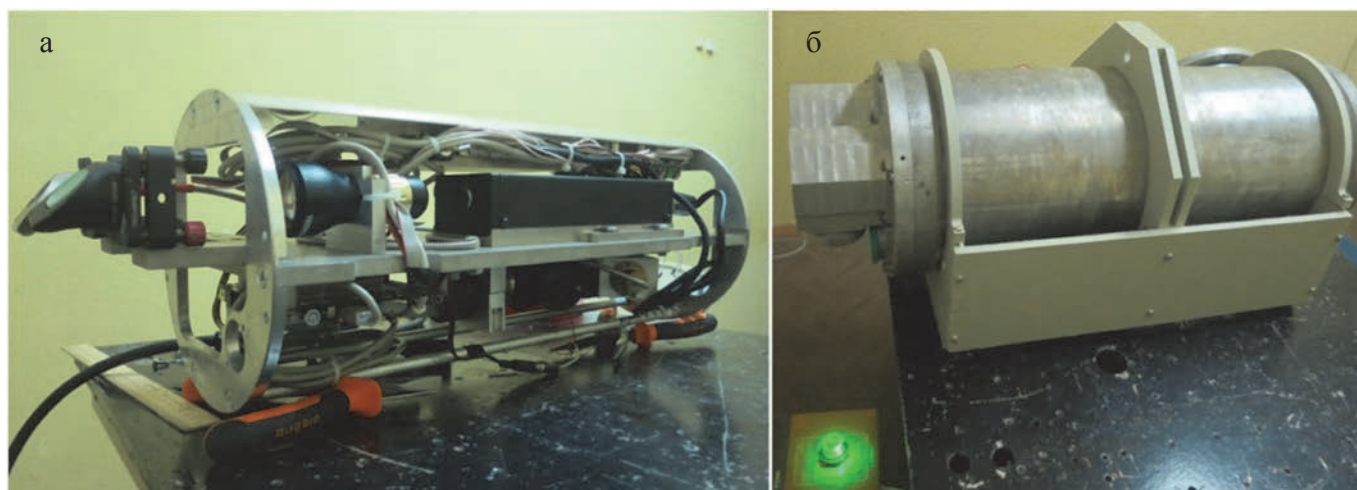


Рис. 2. Аппаратно-программный комплекс на оптической плите (а) и полностью собранный лазерный флуориметр в процессе проведения лабораторных измерений (б)

щения перегрузок сети и контроля переменного тока в сети питания (расположено в НПУ). Программируемый блок питания обеспечивает необходимое напряжение 400 В и его стабилизацию для передачи по трос-кабелю на ТНПА. Блок контроля изоляции кабеля контролирует возможные потери герметичности в блоке энергетики ТНПА и кабеле.

В случае нарушения изоляции кабеля происходит автоматическое отключение питания. Оптомодем предназначен для приёма информационных потоков с АПК и передачи управляющих сигналов на аппарат и погружаемый герметичный модуль. Встроенный в оптомодем аналогово-цифровой преобразователь конвертирует цифровое изображение в аналоговое для дальнейшей передачи на компьютер оператора и видеорегистратор. Компьютер оператора связан с оптомодемом посредством канала связи Ethernet для управления работой отдельных модулей, входящих в состав погружаемого аппаратно-программного комплекса, включая систему бортового управления и навигации ТНПА, а также размещаемые на подводном носителе АПК. Управление блоком лазерной спектроскопии, изменение параметров работы и передача данных на поверхность для последующей обработки происходят следующим образом. Команды вводятся через консоль оператора блока лазерной спектроскопии, соединённого с подводным постом управления через канал передачи данных Ethernet. При поступлении команды включения на внутренний компьютер ITX-N29 компьютер через канал связи RS-232 подает команду для включения блока питания лазера. Одновременно производятся корректировка параметров работы

ПЗС камеры и установка режима работы лазера. Лазер изменяет параметры работы и выводит принятые параметры на консоль оператора. ПЗС-камера выполняет передачу регистрируемых данных на ITX-N29 через канал обмена данными USB2.0, далее возможны сохранение данных на ITX-N29 либо передача через Ethernet на информационную систему ТНПА и дальнейшая передача данных на поверхность в режиме реального времени.

3. Результаты натуральных экспериментов

Натурные испытания отдельных элементов АПК и законченного варианта подводного комплекса были проведены на акватории залива Петра Великого и в Арктических экспедициях 2013 и 2016 гг. на учебно-производственном судне «Профессор Хлюстин» и научно-исследовательском судне «Академик Опарин». Измерения выполнялись на

акватории Баренцева, Чукотского и Восточно-Сибирского морей. На рис. 3 приведены спектры ЛИФ, полученные на акватории Чукотского моря, с использованием разработанного АПК. Измерения концентраций РОВ и хлорофилла А проводились не только для восстановления концентрационных полей на исследуемых акваториях, но и для определения состояния фитопланктонных сообществ по анализу Q-C диаграмм [29]. Согласно полученным спектрам в области 640–650 нм отчетливо регистрируется сигнал комбинационного рассеяния (КР), а в области 675 нм – сигнал флуоресценции хлорофилла А.

Наряду с лазерной флуориметрией проводились измерения вертикального распределения гидрологических параметров морской воды и измерение концентрации хлорофилла А с использованием зонда SBE19 plus v2 производства Sea-Bird Electronics. Это позволило скорректировать калибровку флу-

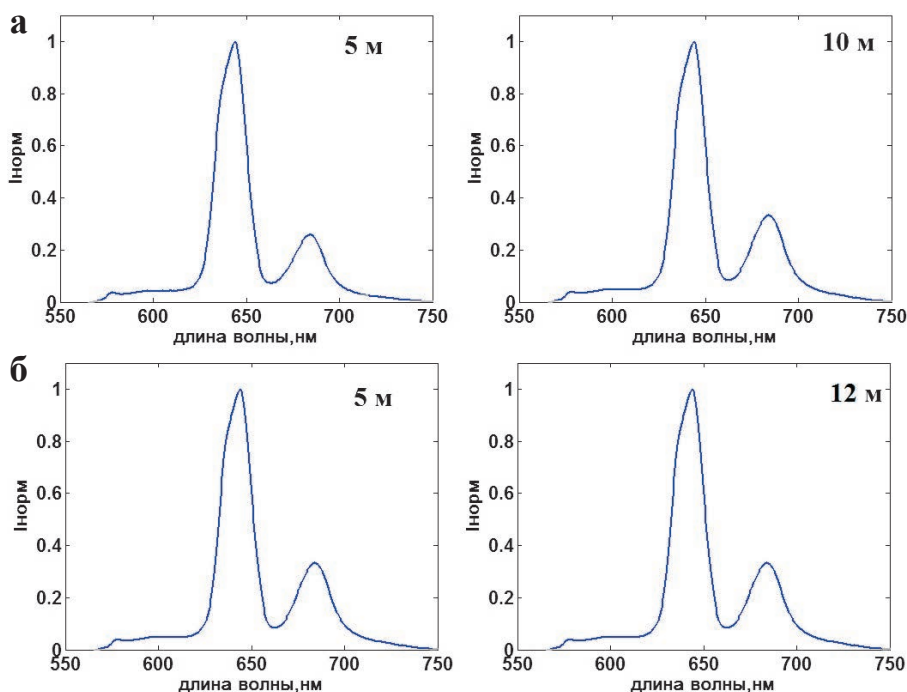


Рис. 3. Спектры ЛИФ на акватории Чукотского моря: а – полученные в районе о-ва Геральда (глубина 10 м), б – полученные на юго-восточном побережье о-ва Врангеля (глубина 12 м). По вертикальным осям отложены нормированные интенсивности спектральных компонент, по горизонтальным – длины волн

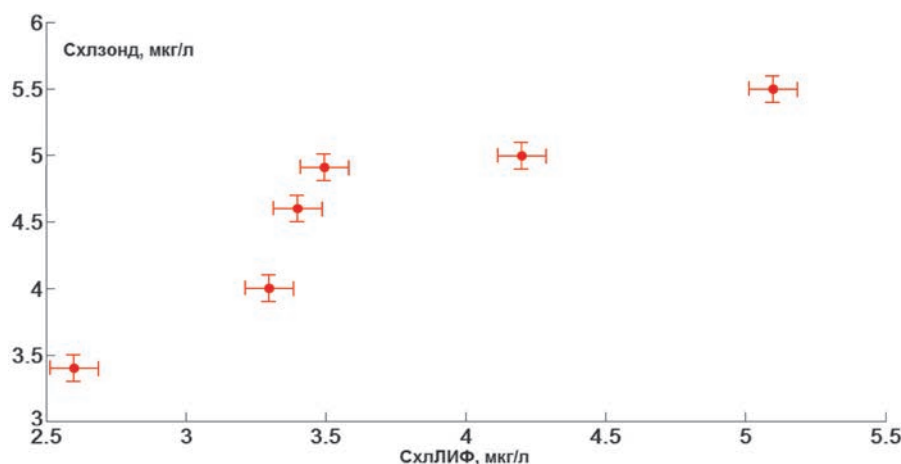


Рис. 4. Калибровка результатов измерения концентрации хлорофилла А сенсором ЛИФ (по горизонтали) на данные зонда (по вертикали)

ориметра на особенности биооптических параметров арктических вод.

Результат калибровки, проведённой в Чукотском море, показан на рис. 4.

Калибровка проводилась при одновременном погружении зонда SBE и модуля лазерного спектрометра. Сравнивались измерения, сделанные на одинаковых глубинах, незначительные отклонения в данных зонда и спектрометра ЛИФ, выходящие за ошибки измерения, объясняются тем, что измерения проводились в различных измеряемых объёмах морской воды.

Разработанный АПК спектрометра ЛИФ представляет собой один из элементов лазерной сенсорики подводной робототехники и может использоваться для дистанционного мониторинга органических веществ, находящихся в морской воде в различных состояниях и формах. Лазерный сенсор ЛИФ, в отличие от обычных измерителей концентрации хлорофилла А и РОВ, позволяет определять параметры, характеризующие состояние фотосинтетического аппарата клеток фитопланктона. Основные преимущества, которые предоставляет метод ЛИФ по сравнению со стандартными измерениями, со-

стоят в следующем: измерения значения концентраций производятся дистанционно и не связаны с необходимостью размещать измеряемый объём морской воды непосредственно в измеритель; возможно выполнять флуоресцентный анализ фито- и зообентоса *in situ*; размещение спектрометра на подводных аппаратах позволяет выбирать необходимые для анализа подводные объекты; информативность спектров ЛИФ даёт возможность определять величины, характеризующие состояние фотосинтезирующего аппарата клеток фитопланктона (удельное воспроизводство РОВ в процессе фотосинтеза), проводить исследования в труднодоступных для стандартных измерителей областях подводных акваторий (местах выходов гидротермальных источников или газовых «факелов», местах расположения исследуемых технических объектов), проводить измерения концентраций растворённых углеводов нефти и определять наличие различных загрязняющих веществ и степень антропогенного воздействия на морскую экосистему.

Измерения, которые были проведены в Арктике с использованием сенсора ЛИФ, позволили исследовать пространственно-вре-

менные распределения хлорофилла А и определить состояние фитопланктонных сообществ (выделить области локального цветения водорослей). Анализ полученных в Чукотском море Q-C диаграмм выявил процесс второго цветения водорослей, соответствующий осеннему периоду. В конце августа наблюдались линейные зависимости биооптических параметров Q и C на акватории Чукотского моря. Эти результаты совпадают с данными о наличии второго процесса цветения водорослей в Арктике, которое соответствует началу осеннего периода и вызвано потеплением, которое регистрируется в Арктике на протяжении последнего десятилетия. [32].

Опыт использования лазерных сенсоров на ТНПА показывает, что дальнейшее развитие дистанционной лазерной ЛИФ-и ЛИС-сенсорики подводной робототехники следует проводить в направлении её адаптации к подводным антропоморфным комплексам подводной робототехники с передачей лазерного излучения по световодным магистралям. Это даёт реальную перспективу значительного уменьшения массогабаритных параметров лазерных сенсоров и возможность оперативного управления процессом и проведения спектрального анализа в труднодоступных исследуемых областях.

В части проведения экспериментов в натурных условиях и разработки спектрометра ЛИФ работа выполнена при поддержке гранта РНФ, проект № 14-19-00589. В части проведения лабораторных исследований взаимодействия лазерного излучения с биологическими морскими объектами и создания единого программного комплекса работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-32-00094 мол_а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Arshad M.R. Recent advancement in sensor technology for underwater applications // *Indian Journal of Marine Sciences*. 2009. V. 38, N 3. P. 267–273.
2. Dinesh Babu Durabu et al. Novel miniature pressure and temperature optical fibre sensor based on an extrinsic Fabry-Perot Interferometer (EFPI) and Fibre Bragg Gratings (FBG) for the Ocean environment // *SENSORS*. IEEE. 2014. P. 394–397.
3. Schill F., Zimmer U.R., Trumpf J. Visible spectrum optical communication and distance sensing for underwater applications // *Proceedings of ACRA*. 2004. P. 1–8.
4. Farr N., Bowen A., Ware J., Pontbriand C., Tivey M. An integrated, underwater optical/acoustic communications system // *OCEANS*. IEEE. 2010. P. 1–6.
5. Hahn D.W., Omenetto N. Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS), part I: review of basic diagnostics and plasma-particle interactions: still-challenging issues within the analytical plasma community // *Applied spectroscopy*. 2010. V. 64, N 12. P. 335A–366A.
6. Tusting R.F., Caimi F.M. Biological-research applications of undersea laser systems // *PACON '88*. Washington DC: Marine Technology Society, 1988. P. 19–28.
7. Roman C., Inglis G., Rutter J. Application of structured light imaging for high resolution mapping of underwater archaeological sites // *OCEANS*. IEEE. 2010. P. 1–9.
8. Библиографическое описание электронного ресурса: описание подводного лазерного трансивера [Электронный ресурс] – http://www.ambalux.com/gdresources/media/AMB_1013_Brochure.pdf. (дата обращения: 30.05.2017).
9. Библиографическое описание электронного ресурса: описание подводной беспроводной оптической системы передачи информации [Электронный ресурс] – <https://www.sonardyne.com/product/bluecomm-underwater-optical-communication-system/> (дата обращения: 30.05.2017).
10. Библиографическое описание электронного ресурса: описание подводной беспроводной оптической системы передачи информации [Электронный ресурс] – <https://www.sonardyne.com/product/bluecomm-underwater-optical-communication-system/> (дата обращения: 30.05.2017).
11. Underwater communication and ranging with a gallium nitride pumped dysprosium laser: заявка 14/627,938 США: МПК7 H 01 S3/11, G 01 S17/88 / Bowman S., Condon N., O'Connor S. – № US20150162721A1; заявл. 20.02.2015; опубл. 11.06.2015.
12. Cremers D.A., Knight A.K. *Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*. John Wiley & Sons, Ltd., 2006.
13. Букин О.А., Алексеев А.В., Ильин А.А., Голик С.С., Царев В.И., Бодин Н.С. Использование лазерной искровой спектроскопии с многоимпульсным возбуждением плазмы для мониторинга качества морской воды и состояния фитопланктона // *Оптика атмосферы и океана*. 2003. Т. 16, № 1. С. 26–32.
14. Hahn D.W., Omenetto N. Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS). Part II: review of instrumental and methodological approaches to material analysis and applications to different fields // *Applied spectroscopy*. 2012. V. 66, N 4. P. 347–419.
15. Maurice S., Wiens R.C., Saccoccio M., Barraclough B., Gasnault O., Forni O., Bernardin J. The ChemCam instrument suite on the Mars Science Laboratory (MSL) rover: Science objectives and mast unit description // *Space Science Reviews*. 2012. V. 170, N 1/4. P. 95–166.
16. Meslin P.Y., Gasnault O., Forni O., Schröder S., Cousin A., Berger G., Le Mouélic S. Soil diversity and hydration as observed by ChemCam at Gale Crater, Mars // *Science*. 2013. V. 341, N 6153. P. 1238670.
17. Martínez G.M., Renno N.O. Water and brines on Mars: current evidence and implications for MSL // *Space Science Reviews*. 2013. V. 175, N 1/4. P. 29–51.
18. Букин О.А., Павлов А.Н., Сушилов Н.В., Эдуардов С.Л. Использование спектроскопии лазерной искры для анализа элементного состава водных сред // *Журн. прикладной спектроскопии*. 1990. Т. 52, № 5. С. 736–738.
19. Goueguel C., Singh J.P., McIntyre D.L., Jain J., Karamalidis A.K. Effect of sodium chloride concentration on elemental analysis of brines by laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) // *Applied spectroscopy*. 2014. V. 68, N 2. P. 213–221.
20. Goueguel C., McIntyre D.L., Singh J.P., Jain J., Karamalidis A.K. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) of a High-Pressure CO₂-Water Mixture: Application to Carbon Sequestration // *Applied spectroscopy*. 2014. V. 68, N 9. P. 997–1003.
21. Thornton B., Takahashi T., Sato T., Sakka T., Tamura A., Matsumoto A., Nozaki T., Ohki T., Ohki K. Development of a deep-sea laser-induced breakdown spectrometer for in situ multi-element chemical analysis // *Deep Sea Research. Part I. Oceanographic Research Papers*. 2015. V. 95. P. 20–36.
22. Букин О.А., Пермяков М.С., Салюк П.А., Майор А.Ю., Буров Д.В., Хованец В.А., Голик С.С., Подопригора Е.Л. Особенности формирования спектров лазерной индуцированной флуоресценции морской воды в период цветения водорослей в различных районах мирового океана // *Оптика атмосферы и океана*. 2004. Т. 17, № 9. С. 742–749.
23. Salyuk P.A., Bukin O.A., Golik S.S., Lastovskaya I.A., Baulo E.N. Laser induced fluorescence spectra dynamics of the seawater biooptical components during phytoplankton cells inhibition: Proceedings of SPIE: Thirteenth Joint International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics // *Atmospheric Physics*. Tomsk, 2006. С. 65221E.
24. Kolber Z.S., Falkowski P.G. Use of active fluorescence to estimate phytoplankton photosynthesis in situ // *Limnology and Oceanography*. 1993. V. 38, N 8. P. 1646–1665.
25. Gereit F., P Hauptmann, Matz G., Mellert V., Reuter R. An ROV-based sensor system for maritime pollution control // *Oceanology International 98 Conference: Conference Proceedings*. Brighton, 1998. V. 2. P. 55–68.
26. Brewer P.G., Malby G., Pasteris J., White S., Peltzer E., Wopenk B., Brown M. Development of a laser Raman spectrometer for deep-ocean science // *Deep Sea Res.* 2004. V. 51. P. 739–753.
27. Sherman A.D., Walz P.M., Brewer P.G. Two Generations of Deep-Ocean Raman In-Situ Spectrometers // *Sea Technology*. 2007. V. 48, N 2. P. 10–13.
28. Федотов Ю.В., Матросова О.А., Белов М.Л., Гордничев В.А. Экспериментальные исследования спектров флуоресценции природных образований и нефтяных загрязнений // *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн*. 2011. № 11 [Электронный ресурс] – <http://technomag.bmstu.ru/doc/256187.html> (дата обращения: 30.05.2017).
29. Букин О.А., Салюк П.А., Майор А.Ю., Павлов А.Н. Исследование процессов воспроизводства органического вещества клетками фитопланктона методом лазерной индуцированной флуоресценции // *Оптика атмосферы и океана*. 2005. Т. 18, № 11. С. 976–983.
30. Салюк П.А. Корреляционные соотношения биооптических компонент спектров лазерной индуцированной флуоресценции морской воды: дис. ... к.ф.-м.н.: 01.04.05 / Дальневост. гос. ун-т путей сообщения. Хабаровск, 2005. 116 с.
31. Быканова А.Ю., Костенко В.В., Кушнерик А.А., Найдено Н.А., Михайлов Д.Н., Родькин Д.Н., Букин И.О. Опыт разработки и перспективы использования малогабаритного телеуправляемого подводного аппарата «МАКС-300» // *Сб. 59-й Междунар. молодежной науч.-техн. конф. «Молодежь, наука, инновации»*. Владивосток, 2011. С. 191–196.
32. Ardyna M., Babin M., Gosselin M., Devred E., Rainville L., Tremblay J.-É. Recent Arctic Ocean sea ice loss triggers novel fall phytoplankton blooms // *Geophys. research letters*. 2014. V. 41, N 17. P. 6207–6212.