

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 535.372; 629.584

Методы лазерной спектроскопии в задачах разработки элементов лазерной сенсорики подводной робототехники

О.А. Букин¹, А.Ю. Майор², Д.Ю. Проценко¹, И.О. Букин¹, В.В. Болотов¹,
А.А. Чехленок¹, С.А. Мун^{1*}

¹ Морской государственный университет им. адмирала Г.И. Невельского
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а

² Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН
690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5

Поступила в редакцию 10.02.2017 г.

Анализируются возможности лазерных технологий для разработки сенсорных элементов подводных роботов и последние разработки в области подводной робототехники, в которых методы лазерной спектроскопии применяются для мониторинга подводных сред. Представлен погружной модуль лазерного спектрометра, предназначенного для исследования спектров комбинационного рассеяния и лазерной индуцированной флуоресценции (ЛИФ). Спектрометр разрабатывался как элемент сенсорики необитаемого телеуправляемого подводного аппарата, обеспечивающий возможности дистанционного обнаружения и измерения концентрации органических веществ, находящихся в морской воде и подводных объектах в различных формах. Описаны результаты натурных испытаний погружаемого спектрометра ЛИФ в различных морских акваториях, включая Арктику.

Ключевые слова: лазерная спектроскопия, лазерная сенсорики, лазерная индуцированная флуоресценция, лазерная искровая спектроскопия, хлорофилл А, флуориметр, ТНПА; laser spectroscopy, laser sensing, laser induced fluorescence, laser induced breakdown spectroscopy, chlorophyll A, fluorometer, ROV.

Уровень развития подводной робототехники является определяющим в вопросах человеческой деятельности в океане. Очень важным является оснащение подводных роботов сенсорами, обеспечивающими их данными об окружающей подводной среде. В последние годы наблюдается значительный прогресс в развитии средств тактильной чувствительности роботов за счет использования контактных сенсоров, измеряющих температуру, давление, жесткость подводных объектов, скорости потоков и т.д. Более высокий уровень сенсорики — это сенсоры, обеспечивающие дистанционное измерение параметров сред и объектов. Такие сенсоры основаны на оптических и акустических методах измерений. Несмотря на то что оптические методы в подводной среде значительно «проигрывают» акустическим в дальности, они позволяют определять те характеристики подводных сред, которые не доступны последним. Лазерная сенсорики в широком смысле — это аппаратно-программные комплексы, которые измеряют параметры подводной среды и обеспечивают

подводным роботам возможности ориентироваться в ней и передавать информацию с использованием лазерных технологий.

Можно выделить несколько направлений разработки оптических (лазерных) сенсоров, где наблюдается значительная активность разработчиков подводной робототехники: прежде всего, это элементы для измерения расстояния, размеров и формы подводных объектов [1]; лазерные модемы, осуществляющие подводную связь между роботами [2]; лазерные спектрометры для определения элементного состава подводных объектов, концентраций органических веществ, содержащихся в морской воде в различных состояниях и формах.

В настоящее время есть законченные разработки лазерных устройств для измерения расстояний между подводными объектами и их размеров, проведения лазерного сканирования их поверхностей, которые успешно используются в подводной робототехнике. Например, лазерные измерители Turhoop VMS позволяют измерять размеры объектов с разрешением порядка 1 мм на глубинах до 3000 м [3]. Сенсоры устанавливаются как на телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА), так и на автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) различных производителей.

Существует широкая линейка подводных лазерных сканеров, предназначенных для использования на различных глубинах, с возможностью интеграции

* Олег Алексеевич Букин (o_bukin@mail.ru); Александр Юрьевич Майор (mayor@iacp.dvo.ru); Дмитрий Юрьевич Проценко (dima.prsk@mail.ru); Илья Олегович Букин (il_bukin@mail.ru); Владислав Валерьевич Болотов (vladislav.bolotov@gmail.com); Алексей Анатольевич Чехленок (alexeyche88@gmail.com); Сергей Александрович Мун (moun@list.ru).

на ТНПА и АНПА, которые сканируют донный ландшафт и выдают детальное изображение дна или объектов под водой [4]. Лазерное сканирование используется также 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 максимальное пространственное разрешение достигает долей миллиметра.

Проблема организации высокоскоростного канала связи между подводными роботами находится на стадии разработок. Нам известны только две компании, выпускающие подобные устройства. Компания Ambalux производит модем 1013C1, который, по заявлениям разработчиков, способен передавать данные на расстоянии от 40 м со скоростью 10 Мбит/с [5]. Компания Sonardyne предлагает три модели подводных оптических модемов: BlueComm 100, BlueComm 200 и BlueComm 5000. Скорость передачи данных – от 1 до 500 Мбит/с, дальность канала связи до 150 м. Однако проблемы, возникающие в реальных подводных средах в случае использования только лазерного канала связи, значительно снижают эффективность данного канала передачи информации. Самые последние разработки – это оптоакустические модемы, которые совмещают возможности акустического канала передавать информацию на большие расстояния между роботами и корректировать положения роботов с высокой скоростью передачи данных лазерного подводного канала связи [6, 7].

Создание лазерных сенсоров, основанных на лазерной искровой спектроскопии (ЛИС) [8] и лазерной индуцированной флуоресценции (ЛИФ) [9], позволяет выйти на новый, более высокий, уровень сенсорики, который значительно расширяет круг задач, решаемых подводными роботизированными системами. Дистанционное определение элементного состава исследуемых объектов дает возможность аналитических исследований образцов породы, технических сооружений и биологических объектов без осуществления операции подъема образцов на поверхность, что исключает вероятность разрушения исследуемого объекта в ходе транспортировки на поверхность и изменения его физико-химических свойств. Сенсорика, созданная с использованием ЛИФ, необходима для проведения подводных исследований морских экосистем, регистрации углеводородов, находящихся на глубине в различных состояниях (растворенные углеводороды нефти, газогидраты), для контроля подводных нефте- и газопроводов.

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 ЛИС применяется практически во всех областях, где необходимо оперативное и точное определение химического состава различных объектов [10]. Стоит отметить, что

на аппарате Curiosity, доставленном на поверхность Марса в августе 2012 г., используется инструмент ChemCam [11], основанный непосредственно на методе лазерной искровой эмиссионной спектроскопии. В ходе спектрометрических измерений были получены данные о наличии следов воды на поверхности красной планеты [12]. На данный момент известны лишь примеры лабораторных исследований и единичных вариантов установок и пробоотборников, предназначенных для проведения измерений химического состава подводных объектов методом ЛИС. Идеи реализации этого метода в подводной среде высказывались еще в 90-х гг. прошлого столетия. Впервые поджиг лазерной искры и получение спектров непосредственно в объеме морской воды были осуществлены в [13]. Из последних подобных работ можно выделить [14]; позднее, в 2014 г., 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 [15]. 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.

Дальнейшее развитие методики ЛИС проводится в направлении использования ультракоротких лазерных импульсов с целью повышения чувствительности метода для измерения концентраций химических элементов, входящих в состав исследуемых сред. Возможности ЛИС для элементного анализа морской воды с использованием лазерных импульсов фемтосекундной длительности в лабораторных условиях были исследованы в [16, 17].

Натурные испытания по изучению химического состава морской воды и минеральных отложений с использованием лазерных спектрометров, установленных на ТНПА на глубинах свыше 1000 м, были впервые проведены с помощью модуля ChemiCam группой специалистов Токийского университета [18]. Данные исследования продемонстрировали эффективность использования метода ЛИС для непосредственного бесконтактного исследования химического состава различных подводных объектов и хорошо согласовывались с ранее полученными результатами. Разработанный измерительный модуль ChemiCam обладает рядом существенных недостатков, главными из которых следует считать вес устройства, составляющий порядка 150 кг, и установочную платформу, обладающую лишь тремя степенями свободы. Это приводит к необходимости использовать дорогостоящие телеуправляемые подводные аппараты рабочего класса с высокой грузоподъемностью (типа Comanche), а также существенно ограничивает возможные области применения данных устройств и не позволяет проводить измерения в труднодоступных подводных участках.

Основная проблема, возникающая при реализации метода ЛИС в подводной среде, по сравнению

с атмосферными условиями, состоит в сложности получения необходимых для развития процесса лазерного пробоя плотностей мощности на исследуемых подводных объектах. Это вызвано сильным ослаблением лазерного излучения при распространении в воде и множеством нелинейных взаимодействий лазерного излучения с морской водой при высоких значениях плотностей мощности излучения, которые предшествуют началу процесса лазерного пробоя.

Спектроскопия ЛИФ также широко используется в различных областях науки и техники как высокочувствительный аналитический метод, в том числе для проведения натурных измерений с самых разных носителей. Однако известны лишь единичные случаи использования спектрометров ЛИФ для исследования подводной среды с использованием ТНПА или АНПА. В 1998 г. спектрометр ЛИФ был установлен на АНПА для проведения испытаний по использованию лазерной спектроскопии для экологического мониторинга подводной среды [19]. Многолетние разработки спектрометров ЛИФ привели к созданию и испытанию в 2002 г. первого образца спектрометра из серии DORISS (Deep Ocean In Situ Spectrometer) [20]. Дальнейшие модификации спектрометров ЛИФ позволили значительно улучшить их характеристики и осуществлять исследования газогидратов до глубин порядка 6000 м, но по-прежнему на ТНПА рабочего класса (типа VENTANA) [21]. Применение ТНПА рабочего класса обуславливает высокую стоимость исследований, что сдерживает использование этих спектрометров для глубоководных исследований. Поэтому разработка малогабаритных спектрометров ЛИФ, которые не требуют мощных источников энергии, представляется актуальной задачей на сегодняшний день. Такие спектрометры могут использоваться на ТНПА обследовательского класса [22–24].

В конечном варианте элемент ЛИФ-сенсорика ТНПА должен обеспечить измерение концентрации хлорофилла А (В и С), растворенного в морской воде органического вещества (РОВ) естественного происхождения (т.е. возникшего в результате процессов жизнедеятельности различных биологических объектов в океане, большей частью фитопланктона), детектировать наличие растворенных в морской воде углеводородов нефти и провести оценку их концентрации. Оптимальный вариант – использование коротковолнового излучения для возбуждения спектров ЛИФ (например, 4-й гармоники Nd:YAG с длиной волны 266 нм). В этом случае можно удовлетворительно разделить участки спектра ЛИФ, которые соответствуют растворенным углеводородам нефти, РОВ и флуоресценции хлорофиллов. Более того, можно решать задачу идентификации углеводородов нефти [25]. Сильное поглощение коротковолнового излучения в морской воде значительно ограничивает использование УФ-излучения.

В нашей версии подводного спектрометра ЛИФ мы ограничились задачей измерения концентрации РОВ и хлорофилла А и использовали более длинноволновое лазерное излучение. Существенным при

выборе лазера являлось требование минимизации массо-габаритных параметров аппаратуры, входящей в состав ЛИФ-сенсора. При этом требовалось 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 подходящий твердотельный лазер YLF:Nd³⁺ и использовать разработанные ранее методики обработки спектров ЛИФ для измерения концентраций и оценки темпов воспроизводства РОВ клетками фитопланктона по анализу параметров Q-C диаграмм [26].

Для того чтобы обеспечить получение корректной информации о концентрации РОВ и хлорофилла А, необходимо восстановить спектральное распределение интенсивности флуоресценции в диапазоне от возбуждающей длины волны до длинноволновой области флуоресценции хлорофиллов. 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 до 750 нм), линия комбинационного рассеяния (КР) 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 В).

Концентрация хлорофилла А измерялась по интегральной интенсивности линии флуоресценции, нормированной на интегральную интенсивность линии КР воды. Методика измерения концентрации хлорофилла А, соответствующая обработке спектральных линий, и калибровка описаны в [27].

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 спектров ЛИФ для измерения концентрации флуоресцирующей части РОВ приведены в [28].

Необходимо отметить, что разработка калибровочных методов для измерения концентрации РОВ и растворенных углеводородов нефти требует дополнительных исследований. Соответствующие измерения *in situ* в реальных подводных средах с использованием спектрометра ЛИФ значительно расширят возможности проведения калибровок на реальные значения концентраций РОВ и растворенных в морской воде нефтепродуктов.

Блок-схема подводного модуля аппаратно-программного комплекса 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 регистрации спектров флуоресценции и КР морской воды на глубинах до 300 м спектральный модуль помещался в герметичный контейнер, оснащенный тремя кварцевыми иллюминаторами диаметром 50 мм. Через один из них осуществлялся вывод лазерного излучения, через остальные — прием излучения, рассеянного в обратном направлении и под углом 90° соответственно.

Излучение лазера (1) направляется на коллиimator (2) с кратностью расширения луча 10. Далее излучение выводится в водную среду. Лазерное излучение индуцирует свечение флуоресценции морской воды, регистрируемое спектрографом (3) с помощью поворотного зеркала (4) и многоканального световода (5). Обратнорассеянное излучение, соответствующее упругому рассеянию на длине волны 527 нм, подавляется системой светофильтров, расположенных на входе световода (5). Конструкция герметичного корпуса устроена таким образом, что прием рассеянного лазерного излучения может осуществлять 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), усиливается с помощью электронно-оптического преобразователя (ЭОП) (6) и регистрируется ПЗС-камерой Видеоскан-285 USB (7) с объективом (8). Для управления и обработки полученных данных используется процессорная плата ITX-N29 (9).

Внутренняя часть аппаратно-программного комплекса (АПК) и сам комплекс, помещенный в герметичный контейнер, изображены на рис. 2. Герметичный контейнер флуориметра представляет собой цилиндр с внутренним диаметром 200 мм и двумя торцевыми крышками. На задней крышке корпуса крепится герморазъем, на передней — три иллюминатора (для зондирующего излучения и приема обратнорассеянного излучения, а также 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 составляет ~7 кг.

Для проведения измерений биооптических параметров морской воды и управления параметрами информационно-измерительной системы было создано единое программное обеспечение (ПО), которое 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, а также происходит предварительная статистическая обработка спектров по последним 10 кадрам.

Отдельные элементы АПК и законченный вариант подводного комплекса были испытаны в акватории залива Петра Великого и в арктических экспедициях 2013 и 2016 гг. на научно-исследовательском судне «Академик Опарин» и учебно-производственном судне «Профессор Хлюстин». Измерения выполнялись в акваториях Баренцева, Чукотского и Восточно-Сибирского морей.

Наряду с испытаниями АПК спектрометра ЛИФ и носителя спектрометра ТНПА выполнялись измерения концентраций РОВ и хлорофилла А для исследования вертикального распределения в верхнем слое океана и определения состояния фитопланктонных сообществ по анализу Q-C диаграмм [26].

Типичные примеры полученных спектров ЛИФ приведены на рис. 3. Согласно этим результатам в области 640–650 нм отчетливо регистрируется сигнал КР, а в области 675 нм — сигнал флуоресценции хлорофилла А.

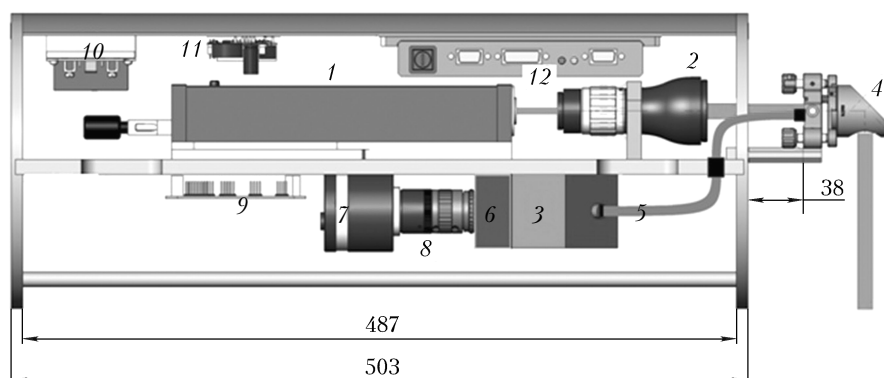
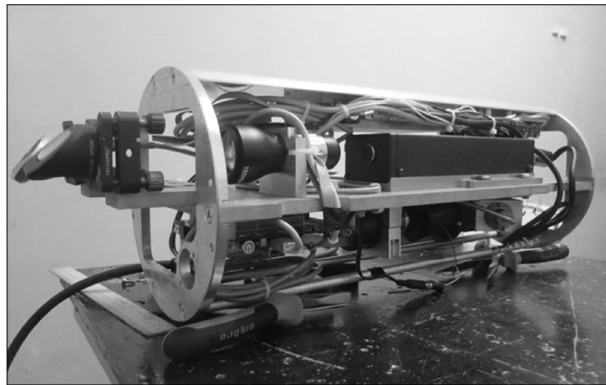
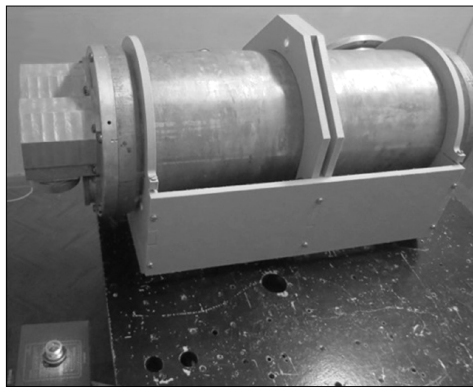


Рис. 1. Схема подводного лазерного флуориметра (световод настроен на прием обратнорассеянного излучения): 1 — лазер DTL-413; 2 — коллиimator; 3 — спектрометр; 4 — поворотное зеркало выходного излучения и приемного канала для обратнорассеянного излучения; 5 — световод; 6 — ЭОП; 7 — ПЗС-камера; 8 — объектив; 9 — процессорная плата ITX-N29; 10 — преобразователь бортового питания 48 В в 12 В (питание лазера); 11 — преобразователь 48В в 5V (питание ITX-N29); 12 — блок питания лазера, управляемый компьютером



а



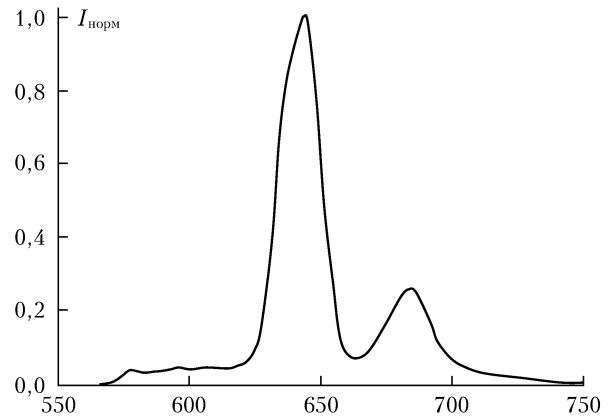
б

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

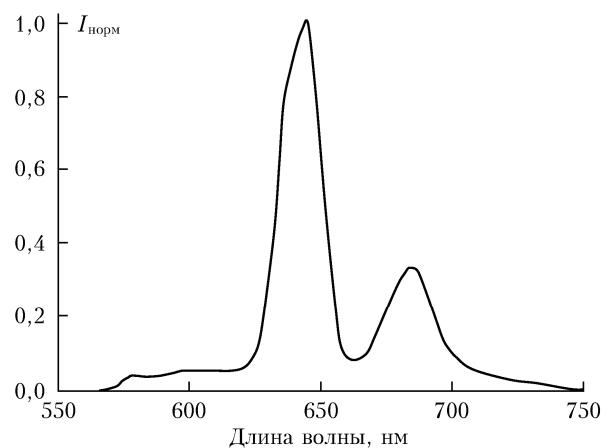
Одновременно измерялись вертикальные распределения гидрологических параметров морской воды и концентрация хлорофилла А с помощью зонда SBE 19 plus v2 производства Sea-Bird Electronics. Это позволило скорректировать калибровку флуориметра на особенности биооптических параметров арктических вод.

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. Те измерения, которые были проведены в Арктике с использованием сенсора ЛИФ, позволили исследовать пространственно-временные распределения хлорофилла А и оценить состояние фитопланктонных сообществ (выделить области локального цветения водорослей). Анализ полученных в Чукотском море Q - S диаграмм выявил процесс второго цветения водорослей, соответствующий осеннему периоду. В конце августа наблюдались линейные зависимости биооптических параметров Q и S на акватории Чукотского моря. Эти результаты совпадают с данными о наличии второго процесса цветения водорослей в Арктике, которое соответствует началу осеннего периода [28].

Опыт использования лазерных АПК на ТНПА показывает, что дальнейшее развитие дистанционной лазерной сенсорики подводной робототехники сле-



а



б

Рис. 3. Спектры ЛИФ морской воды в акватории Чукотского моря: а – в районе о-ва Геральда (глубина 10 м); б – в районе юго-восточного побережья о-ва Врангеля (глубина 12 м)

дует проводить в направлении ее адаптации к подводным антропоморфным комплексам с передачей лазерного излучения по световодным магистралям. Это позволит значительно уменьшить массо-габаритные параметры лазерных сенсоров, а также проводить спектральный анализ и оперативно им управлять в труднодоступных исследуемых областях.

В части проведения экспериментов в натуральных условиях и разработки спектрометра ЛИФ работа поддержана грантом РНФ, проект № 14-19-00589. Лабораторные исследования взаимодействия лазерного излучения с биологическими морскими объектами и создание единого программного комплекса выполнены при поддержке гранта РФФИ № 16-32-00094 мол_а.

1. Schill F., Zimmer U.R., Truppf J. Visible spectrum optical communication and distance sensing for underwater applications // Proc. ACRA. 2004. P. 1–8.
2. Farr N., Bowen A., Ware J., Pontbriand C., Tivey M. An integrated, underwater optical/acoustic communications system // Oceans 2010 IEEE – Sydney, 24–27 May, 2010. P. 1–6.
3. Лазерные измерители Typhoon VMS [Электронный ресурс]. URL: <http://seatronics-group.com/equipment-rental/diving-ndt/subsea-cameras/tritech-typhoon-vms/>

4. *Описание* лазерного сканера [Электронный ресурс]. URL: <http://www.2grobotics.com/products/underwater-laser-scanner-uls-100/>
5. *Описание* оптического модема [Электронный ресурс]. URL: http://www.ambalux.com/gdresources/media/AMB_1013_Brochure.pdf
6. *Описание* оптоакустического модема [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sonardyne.com/product/blue-comm-underwater-optical-communication-system/>
7. Букин О.А., Проценко Д.В., Букин И.О., Буров Д.В., Матецкий В.Т. Заявка на изобретение № 2015155813 (086110). 24.12.2015. «Способ лазерной подводной связи».
8. 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 атмосфер. и океана. 2003. Т. 16, № 1. С. 26–32.
9. Павлов А.Н., Бубновский А.Ю., Букин О.А., Салюк П.А., Голик С.С., Ильин А.А. Лазерные технологии исследования океана // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 10. С. 926–934.
10. 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 // Appl. Spectrosc. 2012. V. 66, N 4. P. 347–419.
11. 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 Sci. Rev. 2012. V. 170, N 1–4. P. 95–166.
12. Meslin P.Y., Gasnault O., Forni O., Schröder S., Le Mouéllic S. Soil diversity and hydration as observed by ChemCam at Gale Crater, Mars // Science. 2013. V. 341, N 6153. P. 1238670.
13. Букин О.А., Павлов А.Н., Сушилов Н.В., Эдуардов С.Л. Использование спектроскопии лазерной искры для анализа элементного состава водных сред // Ж. прикл. спектроскопии. 1990. Т. 52, № 5. С. 736–738.
14. Goueguel C., Singh J.P., McIntyre D.L., Jain J., Karalidis A.K. Effect of sodium chloride concentration on elemental analysis of brines by laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) // Appl. Spectrosc. 2014. V. 68, N 2. P. 213–221.
15. Goueguel C., McIntyre D.L., Singh J.P., Jain J., Karalidis A.K. Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) of a high-pressure CO₂–water mixture: Application to carbon sequestration // Appl. Spectrosc. 2014. V. 68, N 9. P. 997–1003.
16. Голик С.С., Букин О.А., Ильин А.А., Соколова Е.Б., Кульчин Ю.Н., Гальченко А.А. Определение пределов обнаружения элементов в воде методом фемтосекундной лазерно-искровой спектроскопии // Ж. прикл. спектроскопии. 2012. Т. 79, № 3. С. 488–492.
17. Ильин А.А., Букин О.А., Соколова Е.Б., Голик С.С. Сравнение пределов обнаружения элементов в фемтосекундной лазерной искровой спектроскопии // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 5. С. 438–440.
18. 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 Res., Part I. 2015. V. 95. P. 20–36.
19. Gereit F., Hauptmann P., Matz G., Mellert V., Reuter R. An ROV-based sensor system for maritime pollution control // Oceanology International 98 Conference: Proc. Brighton, Conf. 1998, March. V. 2. P. 55–68.
20. 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.
21. Sherman A.D., Walz P.M., Brewer P.G. Sea technology two generation of deep-ocean Raman *in situ* spectrometers // Sea Technol. 2007. N 2. P. 10–13.
22. Бауло Е.Н., Букин И.О., Дорошенко И.М., Майор А.Ю., Салюк П.А. Телеуправляемый подводный комплекс для исследования биооптических параметров морской воды // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 2. С. 262–265.
23. Салюк П.А., Майор А.Ю., Буланов В.А., Корсков И.В., Букин И.О., Буланов А.В., Ляхов Д.Г. Возможности дистанционного обнаружения повышенных концентраций метана в морской воде с использованием методов оптической спектроскопии на подводных телеуправляемых аппаратах // Подводные исследования и робототехника. 2011. V. 2, № 12. С. 43–50.
24. Бауло Е.Н., Букин И.О., Майор А.Ю., Салюк П.А. Разработка лазерных технологий для расширения возможностей подводных аппаратов обследовательского класса для работы в арктических условиях // Морские интеллектуальные технологии. 2013. Т. 1, № 13. С. 38–41.
25. Федотов Ю.В., Матросова О.А., Белов М.Л., Городищев В.А. Экспериментальные исследования спектров флуоресценции природных образований и нефтяных загрязнений // Наука и образование: научное издание. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. № 11. С. 1–13.
26. Букин О.А., Салюк П.А., Майор А.Ю., Павлов А.Н. Исследование процессов воспроизводства органического вещества клетками фитопланктона методом лазерной индуцированной флуоресценции // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18, № 11. С. 976–983.
27. Салюк П.А. Корреляционные соотношения биооптических компонент спектров лазерной индуцированной флуоресценции морской воды: дис. канд. физ.-мат. наук. Владивосток, 2005. 116 с.
28. 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. Res. Lett. 2014. V. 41, N 17. P. 6207–6212.

O.A. Bukin, A.Yu. Mayor, D.Yu. Proschenko, I.O. Bukin, V.V. Bolotov, A.A. Chekhlenok, S.A. Mun.
Laser spectroscopy in the development of laser sensor system of underwater robotics.

Laser technologies used in order to provide the development of ROV sensor elements are presented, as well as the latest results in underwater robotics, where laser spectroscopy methods are applied to underwater environment monitoring. A designed submersible laser spectrometer is presented, intended for research of Raman and laser induced fluorescence (LIF) spectra. The spectrometer was developed and designed as an element of ROV sensor system for detection and measurements of organic matter concentrations in sea water. LIF spectrometer's *in situ* tests in different marine areas including Arctic region are described.