

---

**ПРИГЛАШЕННАЯ СТАТЬЯ**

---

**Фотонные методы и технологии мониторинга океана и атмосферы****Ю.Н.Кульчин, С.С.Вознесенский, Е.Л.Гамаюнов, С.С.Голик, А.А.Ильин, О.Т.Каменев, А.И.Никитин, А.Н.Павлов, А.Ю.Попик, Р.В.Ромашко, Е.П.Субботин**

*Представлен обзор исследований фотонных методов и технологий, перспективных для мониторинга океана и атмосферы, выполненных, главным образом, в последние годы в Институте автоматики и процессов управления ДВО РАН. Приведены результаты лидарных исследований, позволившие выявить особенности процессов взаимодействия океана и атмосферы в условиях перехода континент–океан, которые определяют особенности распределения атмосферного аэрозоля, малых газовых составляющих атмосферы и ее оптических характеристик. Рассмотрены методы и средства совместного оптического и лазерно-флуоресцентного мониторинга поверхности океана. Особое внимание уделено результатам исследований дистанционных методов и средств лазерно-искрового и лазерно-флуоресцентного экологического мониторинга океана в реальном времени, включающих разработку специальных волоконно-оптических зондов и мобильных подводных робототехнических комплексов. Приведены результаты разработки и исследования высокочувствительных и помехозащищенных волоконно-оптических гидро- и сейсмоакустических сенсоров дистанционного мониторинга океана, а также создания роботизированных средств подводной лазерной защиты морских судов, гидротехнических сооружений и океанографических приборов от негативного воздействия биообрастания.*

**Ключевые слова:** лидар, атмосфера, океан, мониторинг, спектр, лазерная индуцированная флуоресценция, лазерная искровая спектроскопия, биообрастание.

**1. Введение**

Мировой океан, покрывающий большую часть поверхности Земли, играет исключительную роль в обеспечении жизни на планете, в формировании погоды и климата. В процессе взаимодействия с атмосферой и геологической подсистемой Земли формируется тепловой и динамический режим Мирового океана, определяющий климат и погоду в различных областях земного шара, появление таких опасных природных явлений, как цунами, тропические ураганы, штормовые нагоны и т. п. Поглощение океаном солнечной энергии определяет процессы циркуляции минеральных и органических веществ и энергии в природных экосистемах, биопродуктивность живых организмов, населяющих Мировой океан, в первую очередь фотосинтетическую активность водорослей, играющих решающую роль в балансе кислорода и углекислого газа в атмосфере. Рост населения Земли, развитие технологий добычи и использования ресурсов Мирового океана оказывают на него постоянно растущее антропогенное влияние, проявляющееся в выбросах парниковых газов, загрязнении прибрежных и океанических вод, чрезмерном изъятии биологических ресурсов.

---

**Ю.Н.Кульчин, С.С.Голик, О.Т.Каменев, Р.В.Ромашко.** Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Россия, 690041 Владивосток, ул. Радио, 5; Дальневосточный федеральный университет, Россия, 690091 Владивосток, ул. Суханова, 8; e-mail: kulchin@iacp.dvo.ru

**С.С.Вознесенский, Е.Л.Гамаюнов, А.А.Ильин, А.И.Никитин, А.Н.Павлов, А.Ю.Попик, Е.П.Субботин.** Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Россия, 690041 Владивосток, ул. Радио, 5; e-mail: triplecks@mail.ru

Поступила в редакцию 28 ноября 2019 г., после доработки – 14 марта 2020 г.

---

Эксплуатация ресурсов Мирового океана требует как новых технологий их разведки, так и методов оценки влияния их извлечения на океаническую среду. Анализ современных методов и средств, используемых для изучения и освоения Мирового океана и тенденций их развития, демонстрирует широту применения различных физико-химических принципов реализации приборов и измерительных технологий, предназначенных для регулярного наблюдения основных гидрофизических и биогеохимических характеристик океана в режиме, близком к реальному времени. Примером могут служить современные лидары, позволяющие с высоким пространственным и временным разрешениями проводить оценку оптических и микрофизических характеристик оптически активных компонентов атмосферы и океана [1–3]. Особое место в этом ряду занимают фотонные методы и средства, обладающие целым рядом уникальных характеристик [4]. К их достоинствам можно отнести электронейтральность и невосприимчивость к электромагнитным помехам, устойчивость к воздействию агрессивной морской среды, небольшой вес, малые габариты, возможность мультиплексирования разнородных сигналов и оценки состояния живых организмов непосредственно в среде обитания.

В связи с этим развитие фотонных методов решения задач изучения и освоения океана открывает новые возможности наблюдения за происходящими в нем изменениями, анализ которых позволяет своевременно обнаруживать, прогнозировать и предотвращать (или смягчать) возникающие опасные явления, осуществлять экологический мониторинг акваторий, своевременно выявлять происходящие изменения и их причины.

В настоящей статье приведен обзор результатов многолетних исследований, выполненных авторами при разработке новых фотонных методов, приборов и техноло-

гий, перспективных для изучения и освоения океана и атмосферы.

## 2. Лидарный мониторинг атмосферы океана

Активное внимание к изучению свойств атмосферного аэрозоля объясняется его ключевой ролью в формировании энергетического баланса атмосферы и в переносе загрязняющих атмосферу веществ. С целью создания карты распределения аэрозоля по земному шару и построения региональных и глобальных аэрозольных моделей атмосферы активно применяются сетевые методы исследования с использованием солнечной фотометрии и многочастотных рамановских лидаров. Фотометрические исследования наиболее полно и детально ведутся в рамках сети AERONET, координирующей работу более 1000 фотометрических станций [5]. Недостаток информации о вертикальном распределении свойств атмосферного аэрозоля эффективно восполняется лидарными станциями. В 2004 г. приступила к работе и окончательно сформировалась к концу 2007 г. лидарная сеть CIS-LINET стран СНГ, объединяющая семь лидарных станций от Минска до Владивостока [6]. Сегодня в Институте автоматизации и процессов управления (ИАПУ) ДВО РАН создан и успешно функционирует лидарный комплекс, в состав которого входят стационарные и мобильные лидары, позволяющий проводить мониторинг высотного распределения атмосферного аэрозоля и малых газовых составляющих атмосферы, таких как водяной пар и озон, в широком диапазоне высот – от приземного слоя до стратосферы.

Начиная с 2009 г., в режиме мониторинга проводятся измерения аэрозольной оптической толщи атмосферы и спектрального состава прямого солнечного излучения методами солнечной фотометрии в двух районах Приморского края [7, 8]. Мониторинг глобального переноса атмосферного аэрозоля позволил исследовать влияние извержения вулкана Гримсвотн в Исландии в 2011 г. [9]. Результаты исследований показали, что аэрозольное возмущение стратосферы наблюдалось около полугода после извержения, при этом перенос вулканического аэрозоля в стратосфере Северного полушария был связан с субтропическим струйным течением [9]. Наличие послед-

него в атмосфере юга Приморского края в значительной мере определяет региональные особенности атмосферного аэрозоля и оптические характеристики атмосферы. Обнаружена характерная (наличие двух максимумов) структура вертикального распределения озона в зимний период, которая обусловлена существованием вертикального переноса воздушных масс в области струйного течения и двойной тропопаузы (рис.1), что обеспечивает механизм обмена воздушными массами между тропосферой и стратосферой, а также возможность захвата и переноса пылевого аэрозоля на дальние расстояния [10–12].

Комплексные исследования оптических характеристик атмосферы в период весеннего муссона позволили определить основные региональные особенности атмосферного аэрозоля южной части Приморского края [7, 8, 13]. Результаты анализа показали, что весенняя атмосфера в исследованном регионе отличается примерно двукратным превышением аэрозольного замутнения в сравнении с другими (морскими и континентальными) районами умеренных широт. Высокие значения аэрозольной оптической толщи обусловлены выносами континентального аэрозоля, преобладающими источниками которого являются аридные (пустыни Гоби и Такла-Макан) и промышленные районы сопредельных территорий Китая [8]. В этот период загруженность аэрозолем атмосферы над акваторией Японского моря становится сравнимой с загруженностью пассатной зоны Атлантики и Моря мрак. В вертикальных профилях аэрозоль-молекулярного рассеяния (рис.2) [7] отчетливо прослеживаются две области повышенного светорассеяния, характеризующие высотное распределение аэрозоля: широкий подтропопаузный слой со статистическим максимумом на высоте 8 км и слой в области пограничного планетарного слоя (на высоте ~2 км). Вариабельность подтропопаузного слоя в значительной степени отражает пылевую активность и перенос аэрозоля (с задержкой примерно на трое суток) из аридных районов Китая и Монголии. Как правило, осаждение пылевого аэрозоля в морские воды сопровождается последующими вспышками цветения микроводорослей [14], поскольку осаждаемые частицы содержат их кормовую базу в виде минеральных удобрений и наночастицы оксидов железа. Именно это зачастую приводит к экологическим

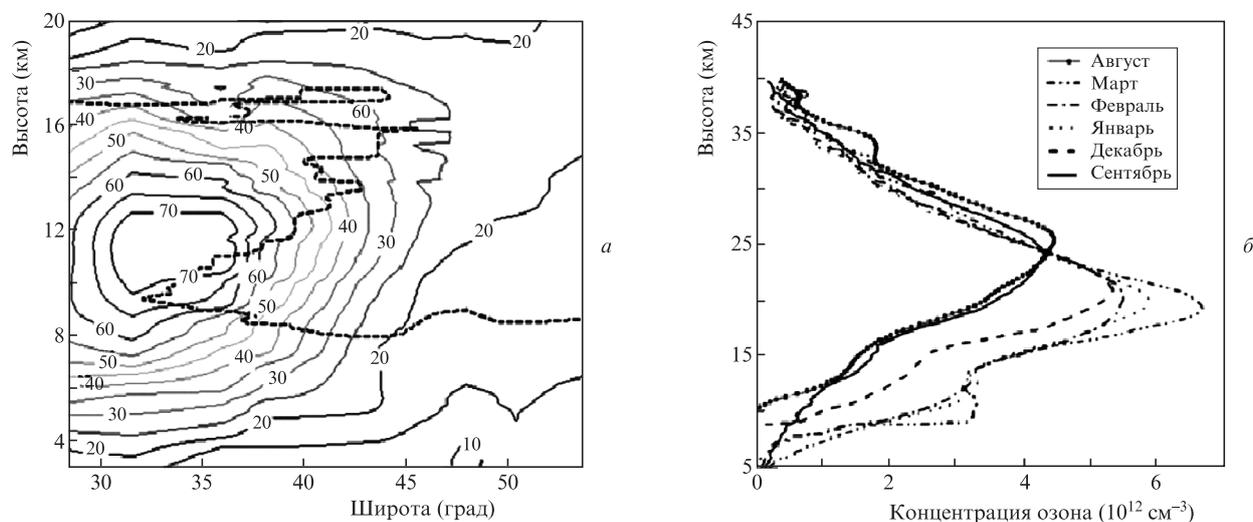


Рис.1. Широтный разрез поля ветра субтропического струйного течения за февраль 2008 г. и положение тропопаузы (штриховая кривая) по данным 13 станций высотного зондирования (а), а также средние профили вертикального распределения озона в различные месяцы 2007–2009 гг. (б).

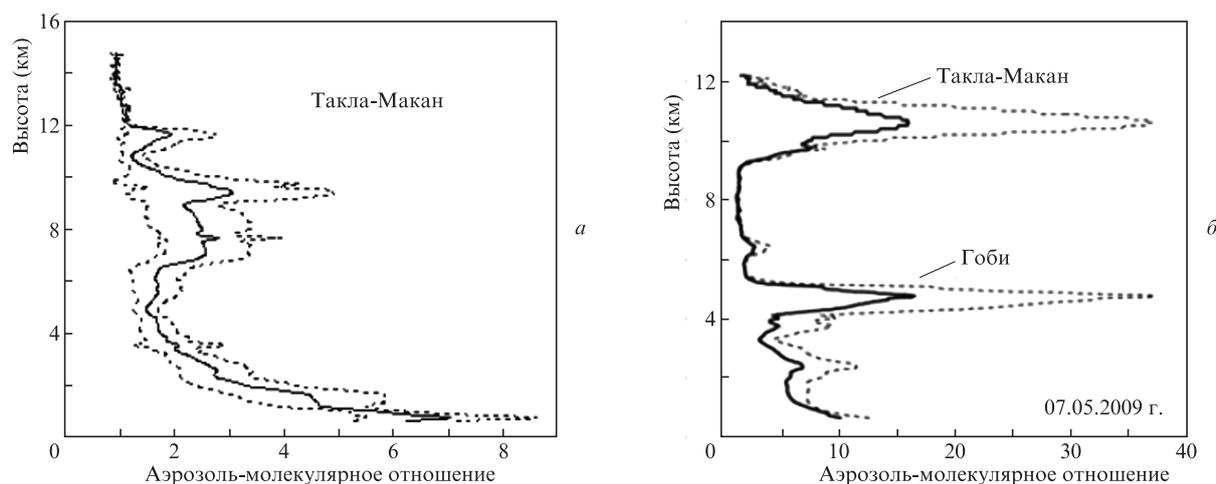


Рис.2. Средние значения (сплошная кривая) и среднеквадратичные ( $\pm$ ) отклонения (штриховые кривые) вертикальных профилей аэрозоль-молекулярного отношения источников аэрозоля – пустыни Такла-Макан (а) и аридных районов пустынь Гоби и Такла-Макан (б) – определенных с помощью обратного траекторного анализа.

катастрофам в океане, время и место возникновения которых теперь можно прогнозировать, используя результаты лидарных измерений.

Контроль за состоянием атмосферы напрямую связан с проблемами глобального потепления и состояния озонового слоя Земли. В связи с этим возникает необходимость углубленного исследования взаимосвязи стратосферных и тропосферных процессов, а также связи стратосферных процессов с погодными аномалиями. Для этого необходимо проведение систематических длительных измерений и определение статистических характеристик измеряемых параметров стратосферы и др. В настоящее время дистанционный мониторинг атмосферных процессов осуществляется преимущественно пассивными методами, глобальность наблюдений при этом достигается за счет размещения систем наблюдения в космосе (спутники MODIS, POLDER, OMI и др.) [15]. Спутниковые измерения позволяют оценивать оптическую толщину аэрозоля в нескольких спектральных каналах, что совместно с наблюдениями сети наземных фотометров позволяет получать информацию о глобальном транспорте аэрозоля и его основных параметрах. Однако такие измерения дают лишь интегральные по высоте характеристики, тогда как воздействие аэрозоля на радиационный поток в значительной степени обусловлено его высотным распределением. Информация о высотном распределении аэрозоля может быть получена только на основе лазерного дистанционного зондирования атмосферы. Созданная в ИАПУ ДВО РАН лидарная станция осуществляет систематическое изучение характеристик атмосферы океана и успешно работает совместно с Центром спутникового мониторинга ИАПУ ДВО РАН, дополняя результаты, предоставляемые средствами космического базирования.

### 3. Лидарно-флуоресцентный и поляризационно-оптический мониторинг поверхности моря

В прибрежных и шельфовых водах Мирового океана сосредоточено более 80% морских биоресурсов. Ключевыми элементами, обеспечивающими жизнедеятельность экосистем прибрежных акваторий, являются динамические

процессы, выполняющие функции очищения и вентиляции вод. Контроль этих процессов, характеризующихся высокой пространственной и временной изменчивостью, не может быть эффективно осуществлен без привлечения дистанционных методов. Одним из них является метод фотограмметрии, применяемый при обработке видео- и радиолокационных изображений морской поверхности [16]. Такие динамические процессы, как поверхностные течения, фронтальные и апвеллинговые зоны, внутренние волны, лэнгмюровская циркуляция, проявляются на морской поверхности в виде «выглаженных» зон («сликов») – областей с подавленным мелкомасштабным ветровым волнением, что делает возможным их визуальное наблюдение. Другая проблема, решение которой возможно при совместном использовании флуоресцентного лидара и метода поляризационной видеосъемки, – это контроль нефтяных разливов и загрязнений морской поверхности органическими пленками. Подобные системы рекомендованы Международной морской организацией (ИМО) для использования в системах оперативного контроля разливов нефти [17]. При этом видеосистема способна предоставить информацию о координатах и масштабах органической пленки, а лидар обеспечивает возможность идентифицировать ее состав по спектру флуоресценции. Разработанный в ИАПУ ДВО РАН малогабаритный флуоресцентный лидар с синхронной системой регистрации позволяет осуществлять зондирование поверхности моря в реальном времени с маломерного катера в любое время суток.

Для регистрации динамических характеристик морской поверхности, картирования органических пленок на поверхности моря и контроля судоходства нами разработана поляризационная сканирующая видеосистема, позволяющая контролировать акваторию в радиусе 7 км и угловом секторе  $270^\circ$  [18–20]. Данная поляризационная видеосистема, установленная на мачте на берегу или на квадрокоптере, позволяет без труда наблюдать динамику мелкомасштабных морских вихрей, встречающихся в прибрежных водах и небольших бухтах. Спиралевидные рукава вихря имеют неоднородную яркостную структуру, которую можно использовать для оценки поля скоростей вращения тела вихря. На рис.3 представлено изображение двух океанических вихрей (антициклонический – сле-

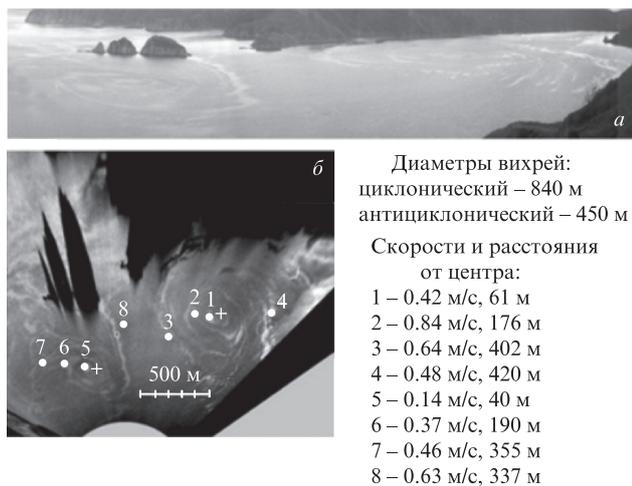


Рис.3. Панорамное (а) и топографическое (б) изображения двух океанических вихрей, наблюдаемых в бухте Витязь с помощью поляризационной видеосистемы.

ва, циклонический – справа), наиболее активных в бухте Витязь в осенний период. Как показали результаты экспериментальных исследований, поляризационная видеосистема также может быть успешно использована при оценке скорости приповерхностного ветра, обеспечивая погрешность измерения не более 10% при скоростях ветра 3 – 7 м/с [19, 21].

Известно, что механизм вертикального перемешивания морских вод и горизонтального переноса их импульса и энергии реализуется, в частности, внутренними гравитационными волнами (ВГВ) [22]. Как правило, ВГВ генерируются в области наибольших градиентов плотности и температуры в толще воды и могут быть обнаружены, проявляясь на оптических изображениях морской поверхности. Высокое временное и пространственное разрешение разработанной нами поляризационной видеосистемы позволяет детально рассмотреть и проанализировать связанные с ВГВ процессы, такие как трансформация распространяющегося в океанической среде одиночного солитона в цуг ВГВ при его выходе на мелководье, взаимодействие цуга ВГВ с мелкомасштабным океаническим вихрем и передача ему энергии и др. [23].

Метод мониторинга поверхности воды с использованием поляризационных видеосистем является существенным дополнением к хорошо зарекомендовавшим себя радиолокационным методам регистрации нефтяных разливов. В связи с этим проблема надежной регистрации, идентификации «сликов» и определения их принадлежно-

сти к пленкам нефтепродуктов в настоящее время находится в центре внимания многочисленных научных групп, работающих в области дистанционного зондирования морской поверхности [24–27]. Нами была разработана модель оптического контраста между изображением, создаваемым тонкой пленкой внутри «слика», и изображением шероховатой морской поверхности вне его границ [26, 27]. На основе этой модели были выполнены оценки контраста «слика» на морской поверхности в зависимости от скорости и направления ветра с учетом условий освещенности морской поверхности. Работоспособность модели была подтверждена в серии экспериментов по регистрации «сликов» с борта квадрокоптера (рис.4,а), на подвеске которого был смонтирован оптический поляриметр. Фрагменты серии изображений нефтяного «слика» на морской поверхности (рис.4,б и в) демонстрируют резкое изменение их контраста по мере увеличения зенитного угла наблюдения.

Выполненные экспериментальные исследования убедительно продемонстрировали возможность обнаружить пленки разлива нефти по оптическим изображениям поверхности моря в поляризованном свете и, дополнив поляризационную систему флуоресцентным лидаром, осуществить классификацию их состава по изменению спектра флуоресценции.

#### 4. Дистанционный (зондовый) волоконно-оптический лазерно-флуоресцентный экологический мониторинг океана

Мониторинг состояния водных сред требует получения в режиме реального времени информации задолго до появления видимых признаков загрязнения, значительно превышающих нормы предельно допустимых концентраций (ПДК). В последние годы в рамках экологического мониторинга состояния акваторий активно исследуются живые организмы, в частности одноклеточные (фитопланктон), отличающиеся повышенной чувствительностью к воздействию неблагоприятных факторов окружающей среды [28]. Как правило, специфическое проявление этих факторов связано с их воздействием на вполне определенные молекулярные структуры клетки. Микроводоросли фитопланктона проявляют высокую чувствительность к достаточно широкому спектру загрязнителей водных сред, в числе которых ионы металлов, гербициды, пестициды, цианиды, метилпаратион (МРТ), N'(3,4-дихлорфенил)-N,N-диметил-мочевина (DCMU), поверхностно-активные вещества (ПАВ) и др. [29–31].

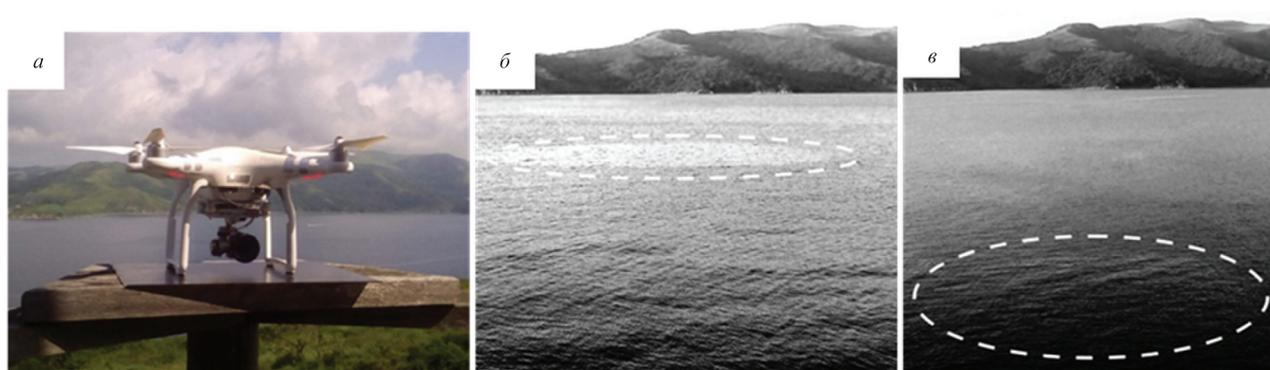


Рис.4. Квадрокоптер с поляриметром на борту (а), а также изображения «сликов» при вертикальных углах наблюдения 86° (б) и 76° (в).

Одним из важнейших свойств одноклеточных водорослей является флуоресцентное свечение пигментов клетки, вызванное лазерным излучением, – лазерно-индуцированная флуоресценция (ЛИФ). Методы измерения ЛИФ характеризуются высокой чувствительностью, оперативностью, возможностью анализа нелинейных параметров флуоресцентного сигнала [32, 33]. Кроме того, флуоресцентный отклик клеток микроводорослей зависит не только от вида и концентрации культуры, но и от условий, в которых они находятся во время измерений: от температуры и освещенности, от присутствия растворенных в воде органических и неорганических веществ [34]. В связи с этим в настоящее время ЛИФ является одним из основных методов, который используется в методиках и приборах для исследования состояния фитопланктона и измерения концентрации микроводорослей непосредственно в среде их обитания без повреждения клеток [35].

Нами разработан оригинальный зондовый волоконно-оптический флуориметр с погружаемым модулем, позволяющий, в отличие от большинства других приборов, производить спектральные измерения в реальном времени и в широком диапазоне длин волн (от фиолетового до ближнего ИК) на глубинах до 100 м (рис.5) [36]. Флуориметр состоит из надводной и погружаемой частей, соединённых друг с другом посредством волоконно-оптического кабель-троса. Надводная часть включает блок генерации и приёма излучения и персональный компьютер, обеспечивающий управление исследованиями и обработку полученных результатов. Флуориметр предназначен для мониторинга в реальном времени пространственного распределения растворенных в морской воде микроводорослей фитопланктона, хлорофилла-*a*, органических и минеральных веществ. Как правило, флуориметр входит в состав судового мобильного лазерного комплекса, который является многофункциональной платформой для осуществления экологического контроля, построения прогнозов продуктивности морских акваторий, поиска месторождений углеводородов, выявления метановой активности донной поверхности.

Спектр ЛИФ определяется входящими в состав клеток микроводорослей пигментами, а также внешними условиями среды. Интенсивность ЛИФ зависит от фотохимических реакций, происходящих в реакционных центрах,

– особенно в комплексах второй фотосистемы (ФС2), которая отвечает не только за поглощение света и генерацию кислорода, но и определяет основную часть спектра флуоресцентного излучения клеток фитопланктона. Спектральная плотность флуоресценции природного фитопланктона является средневзвешенной величиной, зависящей от относительного количества комплексов ФС2, от интенсивности индуцирующего излучения и состояния хлорофилла-*a* в этих комплексах [37]. Поэтому ЛИФ позволяет выявлять наличие повреждений клеток фитопланктона при воздействии антропогенных и природных загрязнений задолго до того, как это внешне проявится в уменьшении их численности.

Повышение температуры приводит к нефотохимическому тушению ЛИФ для хлорофилла-*a*, что нам необходимо учитывать при определении его концентрации [38, 39]. Результаты исследования температурных зависимостей флуоресценции более 20 видов микроводорослей позволили предложить новый метод их распознавания [40]. С этой целью нами был создан специальный погружаемый волоконно-оптический флуоресцентный зонд, содержащий проточную камеру, в которой производится нагрев, охлаждение и стабилизация температуры воды в широком диапазоне температур [41]. Использование такого зонда открыло возможность исследования в реальном времени концентрации и биоразнообразия фитопланктонного сообщества в местах и на глубинах, представляющих наибольший интерес для оценки и прогнозирования экологического состояния акваторий.

В настоящее время существуют несколько основных подходов к реализации биосенсоров на основе измерения ЛИФ природного фитопланктона. Многочисленные исследования показали, что перспективным направлением является разработка биологических сенсоров на основе колонии обездвиженных клеток микроводорослей, помещенных в пористую водопроницаемую среду [42–46]. В данном случае малые размеры пор препятствуют движению клеток и их делению, что позволяет придать им пространственную и временную стабильность, обеспечить их удобное хранение и избежать использования жидких растворов.

Как показано в [45], биосенсоры на основе обездвиженных клеток микроводорослей обеспечивают чувстви-

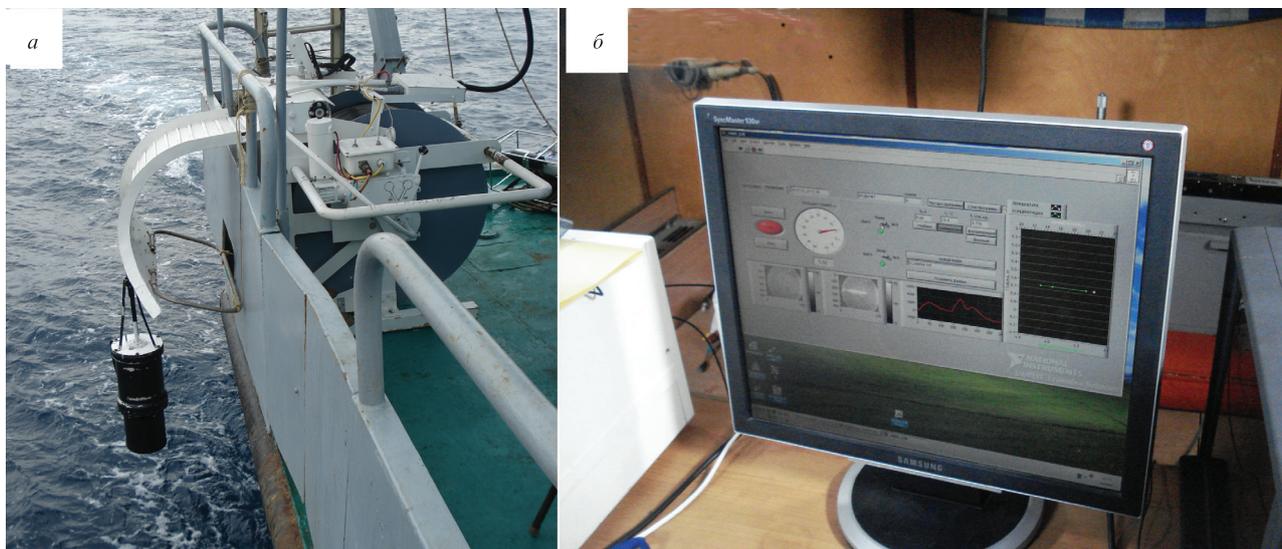


Рис.5. Судовой мобильный лазерный комплекс с погружаемым волоконно-оптическим модулем (а) и рабочее место оператора (б).

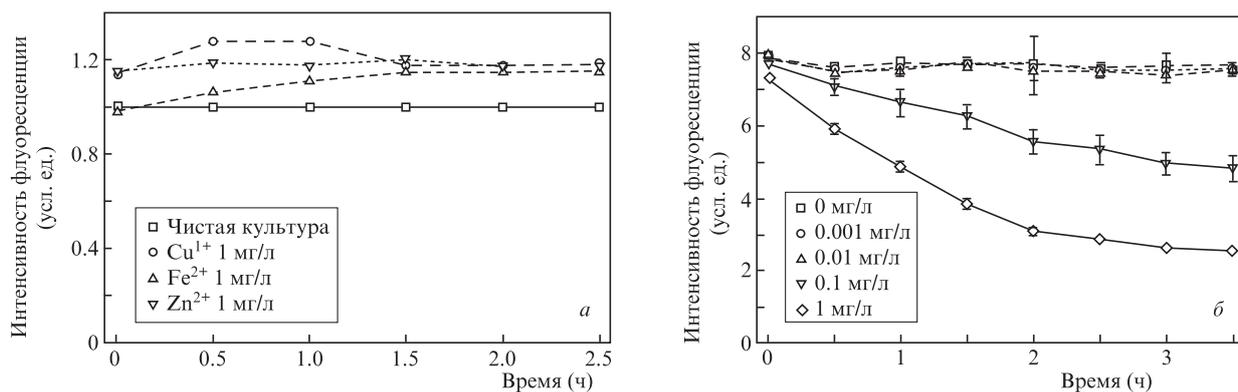


Рис.6. Изменение интенсивности флуоресценции хлорофилла *Nannochloris maculata* под действием солей меди, железа и цинка с концентрацией, равной ПДК (а), и интенсивность флуоресценции *Tisochrysis lutea* ( $27.25 \times 10^4$  клеток/л) на длине волны 685 нм под действием ионов меди различной концентрации (б).

тельность на уровне десятых долей ПДК растворенных химических элементов. Это стимулировало исследования по видовому поиску культур микроводорослей и конструкций матриц для их обездвиживания, позволяющих с высокой точностью определять присутствие в среде конкретных химических веществ. На рис.6 приведены результаты экспериментов, выполненных с культурами микроводорослей *Nannochloris maculata* и *Tisochrysis lutea* [47], обездвиженных и помещенных в пористую силикатную матрицу [48], в присутствии растворов солей меди, цинка и железа (II). Приведенные зависимости иллюстрируют происходящее со временем изменение интенсивности флуоресцентного излучения хлорофилла-а культуры *Nannochloris maculata* на длине волны 680 нм при наличии в растворе солей меди, цинка и железа (II) с концентрацией, равной ПДК, и культуры *Tisochrysis lutea* на длине волны 685 нм для различных концентраций ионов меди. Полученные результаты подтверждают высокую чувствительность и реакционную способность выбранных культур микроводорослей к происходящему загрязнению среды их обитания. Это позволяет использовать данные объекты в качестве природных сенсоров для мониторинга экологического состояния окружающей среды.

## 5. Автоматизированный мониторинг химического состава океанической среды методом лазерно-искровой спектроскопии

Для решения задач освоения шельфа, мониторинга океана, изучения биопродуктивности морских вод, экологического мониторинга загрязнения морей и прибрежных акваторий наряду со стандартными био- и геохимическими методами требуется разработка экспресс-методов дистанционного анализа элементного состава жидких сред, не требующих предварительной пробоподготовки. Такие экспресс-методы должны отвечать следующим требованиям: охватывать широкий ряд анализируемых химических элементов, обеспечивать высокое быстродействие, воспроизводимость результатов измерений и обладать высокой чувствительностью. Лазерно-искровая спектроскопия (ЛИС) является мощным методом проведения качественного и количественного *in situ* анализа вещества, удовлетворяющим основным вышеуказанным требованиям [48]. Как показано в [49, 50], ЛИС является перспективным методом для геохимического, экологическо-

го, водного и подводного зондирования. Недостатком метода ЛИС при анализе жидких сред является относительно невысокая чувствительность, поэтому большое внимание уделяется повышению его чувствительности [48], т. к. предел обнаружения (LOD, limit of detection) для многих химических элементов при возбуждении плазмы импульсами наносекундной длительности находится на уровне единиц ppm. Как правило, для повышения чувствительности и предела обнаружения метода ЛИС используется техника временного стробирования, при котором оптимальные значения времени задержки регистрации сигнала  $t_d$  относительно лазерного импульса и времени экспозиции сигнала  $t_g$  зависят от определяемого химического элемента и способа возбуждения плазмы на поверхности образца [48–50].

Как показали результаты наших исследований, одним из способов повышения чувствительности метода ЛИС является использование лазерных импульсов фемтосекундной длительности для возбуждения плазмы оптического пробоя на поверхности образцов (фемтосекундная ЛИС) (ФЛИС) [51–53]. Особенности ФЛИС – относительно низкие пределы обнаружения элементов в водных растворах, а также возможность анализа элементного состава на поверхности жидкости при частотах следования импульсов (ЧСИ) до 1 кГц, что очень важно для мониторинга водных сред в режиме реального времени [53]. Увеличение чувствительности при переходе к ФЛИС обусловлено, в частности, тем, что механические и термодинамические параметры плазмы лазерного пробоя сильно различаются для импульсов наносекундной и фемтосекундной длительности [54]. Для атомов и ионов фемтосекундной плазмы, генерируемой на поверхности жидкости, существенную роль играет накачка возбужденных состояний электронным ударом из основного состояния [55]. Данный факт является следствием малости температуры и электронной плотности (по сравнению с плазмой, возбуждаемой импульсами наносекундной длительности), что приводит к низкой интенсивности сплошного спектра [51, 53]. Кроме того, при фемтосекундной длительности импульса меняются и временные зависимости интенсивностей сплошного и линейчатого спектров плазмы [56], наблюдается меньшее количество выбрасываемых капель жидкости на фокусирующую оптику и отсутствие линий ионов азота и кислорода в оптических спектрах [51, 54].

Нами были определены оптимальные временные задержки регистрации спектров  $t_d$  времязрешенной ФЛИС

Табл.1. Пределы обнаружения химических элементов в водных растворах методом ФЛИС.

Химический элемент	$\lambda$ (нм)	$E$ (мДж)	$t_d$ (с)	ЧСИ (кГц)	LOD (мг/л)
AlI	396.1	1	150	1	0.19
BaII	455.4	1	72	0.1	0.08
CaII	393.3	1	55	0.5	0.01
CuI	324.7	1	92	0.1	0.78
KI	766.5	1	180	1	0.006
MgI	285.2	1	120	1	1
NaI	588.9	1	210	1	0.0009
ZnI	213.8	1	57	1	2.5
FeI	373.7	1	160	1	3.4
FeI	371.99	7	160	0.05	2.6
FeI	377.99	7	190	0.05	3.0

для девяти химических элементов (табл.1), а также рассчитаны пределы обнаружения ряда химических элементов для импульсов с энергией  $E = 1$  и  $7$  мДж [52, 53]. Установлено, что повысить интенсивность линейчатого спектра в ФЛИС (помимо техники временного стробирования) можно, увеличив плотность мощности излучения на поверхности образца посредством более острой фокусировки лазерного пучка либо повысив энергию импульса [53]. Следует отметить, что для эффективного возбуждения эмиссионных атомных линий химических элементов предпочтительнее увеличивать плотность мощности

излучения в области фокусировки, уменьшая фокусное расстояние линзы, а в случаях необходимости более удаленных измерений – увеличивая энергию в импульсе [52]. Исследование влияния частоты следования лазерных импульсов (в диапазоне  $50–1000$  Гц) на пределы обнаружения Mg, Mn, Pb, Sr в воде методом ФЛИС показали, что для максимальной эффективности возбуждения эмиссионных линий необходимо использовать ЧСИ, близкую к  $166$  Гц [56].

Из данных табл.1 следует, что в водных растворах ФЛИС обеспечивает пределы обнаружения  $10^{-3}–10^{-6}$  г/л в зависимости от вида определяемого химического элемента [57]. Использование лазеров ультракороткой длительности импульсов уже сегодня позволяет создавать компактные установки с миллиджоульным уровнем энергии импульса, способные работать в судовых условиях.

В настоящее время важное значение приобретает освоение океана, особенно его континентального шельфа, что, в совокупности с развитием подводных лазерных технологий, стимулирует создание и размещение на телеуправляемых обитаемых подводных аппаратах (ТНПА) аппаратуры химического экспресс-анализа. С этой целью нами был создан мобильный подводный робототехнический комплекс для определения химического состава воды в реальном времени на основе лазерно-искрового спектрометра и ТНПА обследовательского класса (рис.7), натурные испытания которого проводились с июля по октябрь 2018 г. [58].

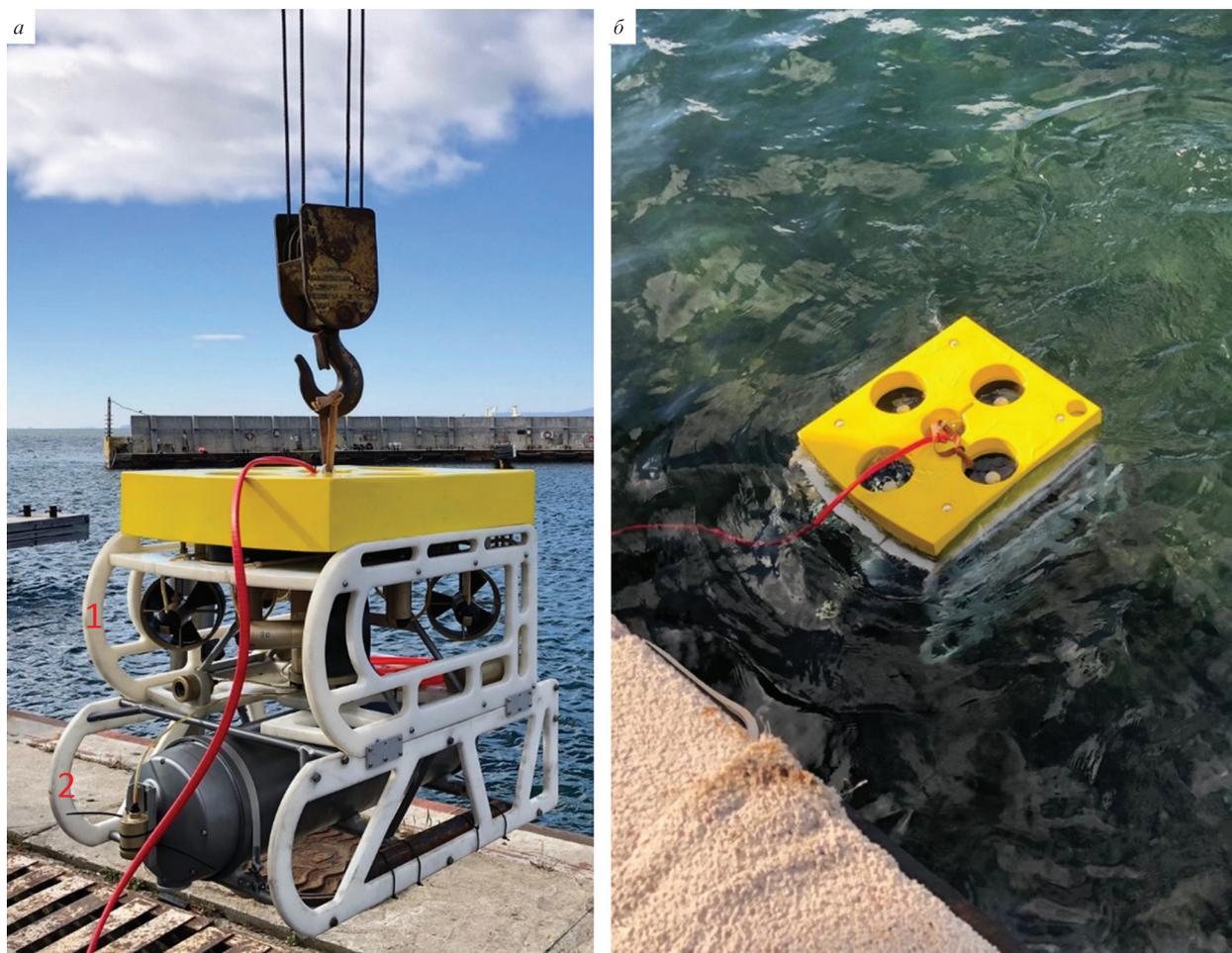


Рис.7. Фотографии подводного робототехнического комплекса для определения химического состава воды в реальном времени в период проведения натурных испытаний, октябрь 2018 г.

Комплекс состоит из двух основных блоков: телеуправляемого необитаемого подводного аппарата (основные характеристики: глубина погружения до 150 м, максимальная скорость погружения до 1 м/с, максимальная скорость движения до 2 м/с) и блока из лазерно-искрового спектрометра с источником возбуждения (Nd:YAG-лазер с диодной накачкой) и микрокомпьютером. Связь между двумя основными блоками и надводным пультом управления осуществляется по сети Ethernet, полученные спектральные данные обрабатываются на платформе MATLAB. При разработке мобильного лазерно-искрового спектрометра также учитывался тот факт, что по сравнению с лазерной плазмой, создаваемой в толще воды, плазма в газовом окружении (на поверхности грунта или воды) имеет более высокую температуру и позволяет регистрировать большее количество химических элементов с меньшими пределами обнаружения [48]. Поэтому в конструкции спектрометра предусмотрен канал подачи газа (воздуха) для создания газовой атмосферы при проведении анализа.

Созданный мобильный подводный робототехнический измерительный комплекс не требует при проведении исследований использования судов специального типа и позволяет работать непосредственно с борта исследовательского судна, с необорудованного берега либо пирса на расстояниях до 400 м от пульта оператора [58, 59].

## 6. Волоконно-оптические сенсоры для гидроакустического мониторинга мелкого моря

Решение задач оценки подводной обстановки, зондирования подводных объектов, мониторинга океана и подводной связи неразрывно связано с созданием эффективных средств надежной регистрации гидроакустических сигналов. Одной из нетривиальных задач гидроакустического мониторинга является регистрация акустических сигналов в условиях мелкого моря. К особенностям этой ситуации следует отнести наличие множественной интерференции акустических волн, многократно отражающихся от дна и поверхности воды, распределение которой изменяется во времени вследствие волнения поверхности моря, что обуславливает флуктуацию уровня акустического сигнала в месте его приема [60].

В большинстве современных гидрофонов используются электрические преобразователи [61, 62], к недостаткам которых относятся подверженность влиянию электромагнитных помех и необходимость использования длинных электрических кабелей для передачи слабых сигналов на значительные расстояния. Решение этих проблем напрямую связано с развитием неэлектрических аналогов приемников акустических сигналов и, в первую очередь, – приемников на основе волоконно-оптической элементной базы [61]. Использование высокочувствительных интерферометрических принципов измерений при построении волоконно-оптических гидрофонов открывает перспективы детектирования сверхслабых акустических сигналов [62]. Вместе с тем интерферометрические измерительные системы, в силу их высокой чувствительности, подвержены влиянию неконтролируемых внешних факторов (случайные механические воздействия, дрейф температуры, давления и пр.), что на практике сводит на нет все их достоинства. Применение в волоконных интерферометри-

ческих гидрофонах электронных систем стабилизации рабочих характеристик [63, 64] приводит к значительному усложнению измерительной системы, непропорциональному росту ее габаритов и снижению надежности, мобильности и автономности.

Альтернативой классическому гомодинному оптическому интерферометру с активной системой стабилизации служит адаптивный голографический интерферометр, световые пучки в котором объединяются с помощью динамической голограммы, записываемой в фоторефрактивном кристалле [65–68]. Величина, обратная времени записи динамической голограммы, называется частотой отсечки  $f_0$ . Благодаря тому, что динамическая голограмма постоянно перезаписывается, происходит удержание рабочей точки интерферометра на линейном участке рабочей характеристики, соответствующем его максимальной чувствительности, а сам интерферометр подстраивается ко всем воздействиям (шумам), частота которых ниже  $f_0$ , и устойчиво регистрирует все воздействия, частота которых выше  $f_0$ . Как следствие, адаптивный лазерный гидрофон (АЛГ) приобретает способность устойчиво регистрировать слабые акустические сигналы в реальных условиях при наличии значительных неконтролируемых воздействий со стороны окружающей среды и, тем самым, обеспечивает устойчивую регистрацию гидроакустических сигналов в условиях мелкого моря.

Нами были разработаны АЛГ с мембранным и катушечным преобразователями акустического давления [68–71]. В мембранном преобразователе чувствительным элементом служит встроенная в корпус гидрофона металлическая мембрана с зеркальным покрытием. Ее колебания, вызванные полем акустической волны, приводят к модуляции фазы отраженной сигнальной волны. В катушечном преобразователе волоконный световод (ВС) сигнального плеча интерферометра наматывается на упругий каркас цилиндрической формы из экструзионного пенополистирола. Под действием акустического поля упругий цилиндр изменяет свои размеры, что приводит к изменению длины намотанного на него ВС и, как следствие, к модуляции фазы распространяющегося лазерного излучения.

Для АЛГ, созданного на основе записываемой в кристалле CdTe динамической голограммы, время записи составляло  $\sim 5$  мс ( $f_0 = 200$  Гц), что в условиях суточных перепадов температуры  $\pm 10^\circ\text{C}$ , а также при наличии случайных внешних механических воздействий позволило обеспечить регистрацию слабых акустических сигналов с частотами более 200 Гц. При этом флуктуации детектируемого сигнала не превысили 1% в течение 24 ч непрерывной работы [66]. Было установлено, что АЛГ мембранного и катушечного типов обладают чувствительностью в полосе частот более 100 кГц, которая для мембранного АЛГ на частоте 10.5 кГц составляет 6.2 мрад/Па [69], для катушечного АЛГ на частоте 6.5 кГц – 4.1 мрад/Па [70].

На рис.8,а дана фотография мобильного варианта волоконно-оптического адаптивного лазерного гидрофона (МАЛГ) с чувствительным элементом катушечного типа. Испытания МАЛГ проводились в акватории Владивостока (бухта Золотой Рог, пролив Босфор Восточный) при температуре окружающей среды  $-3^\circ\text{C}$ , температуре воды  $1^\circ\text{C}$ , скорости ветра 13 м/с, умеренном волнении моря и интенсивных портовых шумах, создаваемых движением судов. МАЛГ, а также все испытательное оборудование, размещались на причальной стенке морского пир-

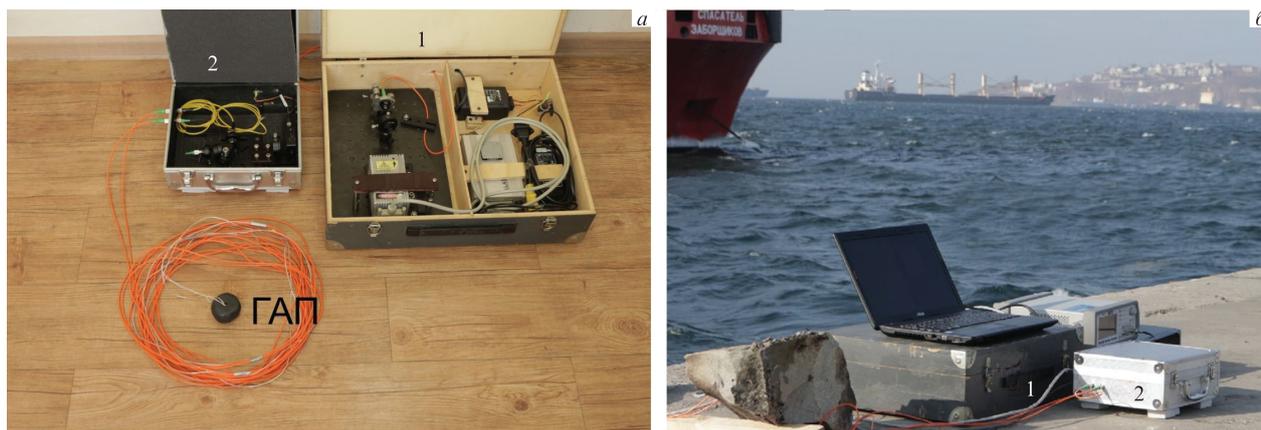


Рис.8. Внешний вид МАЛГ (1 – лазерный модуль, 2 – интерферометрический модуль, ГАП – катушечный волоконно-оптический гидроакустический приемник) (а) и фотография этапа натурных испытания МАЛГ у причальной стенки в акватории бухты Золотой Рог (б).

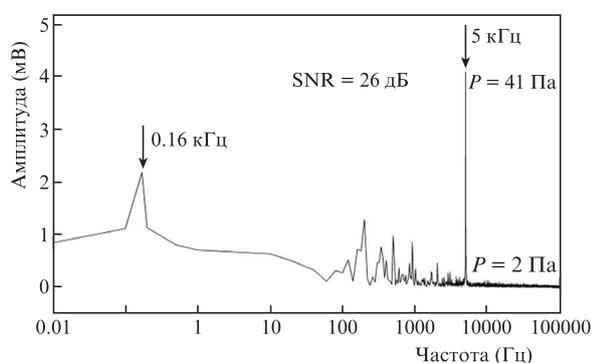


Рис.9. Спектр выходного сигнала МАЛГ при регистрации тестового гидроакустического сигнала в условиях реальной морской акватории ( $P$  – давление).

са (рис.8,б) [71]. В акватории с помощью пьезоэлектрического излучателя создавалось поле гидроакустической волны на частоте 5 кГц. На рис.9 представлен спектр зарегистрированного при помощи МАЛГ тестового гидроакустического сигнала. Несмотря на значительное низкочастотное шумовое воздействие в акватории, МАЛГ обеспечивал устойчивую регистрацию гидроакустического сигнала на рабочей частоте 5 кГц. При этом на временном интервале 45 мин изменения амплитуды непрерывного гидроакустического сигнала не превысили 5%, а отношение сигнал/шум (SNR) составило 26 дБ.

Таким образом, волоконно-оптический лазерный гидрофон, построенный на основе адаптивного голографического интерферометра, способен обеспечить устойчивую регистрацию слабых гидроакустических сигналов в реальных условиях, характеризующихся такими дестабилизирующими факторами, как дрейф температуры и давления окружающей среды, наличие течений и волнения, в том числе в условиях мелкого моря, а также промышленных шумов, вызванных близостью портовой инфраструктуры, движением морских судов и пр.

## 7. Сейсмоакустические волоконно-оптические сенсоры для низкочастотного мониторинга океана

В настоящее время наблюдается устойчивая тенденция перехода в низкочастотный (НЧ) и инфранизкочастот-

ный (ИНЧ) диапазоны работы систем акустического мониторинга океана. Это обусловлено тем, что акустические сигналы в диапазоне десятков и сотен герц оказываются наиболее эффективным «инструментом» диагностики и мониторинга океана на больших масштабах – от десятков до тысяч километров. Уже сегодня возможность сверхдальнего распространения НЧ акустических волн в океанической среде широко используется для различных военных и гражданских применений. Это, в частности, обнаружение подводных целей, классификация и локализация объектов, геологическое картирование и профилирование толщи дна, топография океана, акустическая голография, сейсмическое моделирование и измерение, измерение биологического шума, обнаружение цунами и др. [72].

В связи с вышеуказанным, крайне необходимо создание быстродействующих, компактных, надежных, дешевых, с низким энергопотреблением сенсоров НЧ и ИНЧ (сейсмоакустического) акустического мониторинга океана [73, 74]. Поскольку традиционные пьезоэлектрические сейсмоприемники не обладают достаточной чувствительностью на частотах менее 10 Гц, а электродинамические сейсмоприемники в морской сейсмоакустике применять затруднительно [75], в последние десятилетия для мониторинга океана, систем подводной охраны периметра, гидроакустической связи и др. все более активно начинают использоваться волоконно-оптические сенсорные системы, которые позволяют решить данную проблему [76–78].

При построении ИНЧ волоконно-оптических сейсмоприемников наибольший интерес представляет достаточно простая схема интерферометра Маха–Цендера, в одном из измерительных плеч которого расположен чувствительный элемент с присоединенной инерциальной массой, обеспечивающий преобразование колебательного движения поверхности в изменение длины световода и связанное с этим изменение фазы распространяющегося по нему излучения [79].

Поскольку двухплечевой волоконный интерферометр Маха–Цендера обеспечивает возможность регистрации изменения фазы оптического излучения до уровня  $10^{-7}$  рад/Гц<sup>1/2</sup> [80], то при коэффициенте фазового преобразования сигнала  $S = 0.1$  рад·м<sup>-1</sup>·с<sup>2</sup> [82] это позволяет иметь пороговую чувствительность волоконно-оптического сейсмоприемника  $10^{-6}$  м·с<sup>-2</sup>·Гц<sup>1/2</sup>.

Главной проблемой ИНЧ волоконных интерферометров Маха–Цендера является дрейф рабочей точки, обу-

словленный нестабильностью длины волны лазерных источников излучения и неконтролируемым изменением температуры окружающей среды. Для устранения этой проблемы применяют различные методы фазовой демодуляции, среди которых можно выделить активное и пассивное гомодинирование сигналов [81, 82]. При активном гомодинировании стабилизация положения рабочей точки на середине линейного участка передаточной характеристики интерферометра (квадратурный режим работы) достигается за счет использования в опорном плече дополнительного пьезокерамического фазового модулятора, который компенсирует дрейф рабочей точки [83]. Такой метод демодуляции позволяет удерживать интерферометр в квадратурном режиме при дрейфе рабочей точки со скоростью до 2000 рад/с [84].

На вставке рис.10 представлена фотография разработанного в ИАПУ ДВО РАН волоконно-оптического акселерометра на основе интерферометра Маха–Цендера, в котором используется метод активного гомодинирования [82]. Многовитковый чувствительный элемент (МЧЭ) акселерометра конструктивно состоит из двух цилиндров, на которые намотан волоконный световод. При этом один из цилиндров жестко соединен с корпусом акселерометра, а второй выполняет роль инертной массы. Резонансная частота такого МЧЭ определяется жесткостью и числом витков волоконного световода, а также величиной выбранной инертной массы [79]. На рис.10 (кривая 1) приведена амплитудно-частотная характеристика волоконно-оптического акселерометра, в сигнальном плече которого находятся 10 витков одномодового волоконного световода с жесткостью 16.3 кН/м и присоединенная инертная масса весом 1 кг. В области низких частот коэффициент фазового преобразования МЧЭ акселерометра  $S = 500 \text{ рад} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^2$ , что при уровне собственных шумов измерительной схемы 100 мкВ обеспечивает на частоте 20 Гц пороговую чувствительность  $\sim 10^{-7} \text{ м/с}^2$ .

На рис.11 приведены временные записи сигналов землетрясения с магнитудой 4.7 балла, произошедшего 2 де-

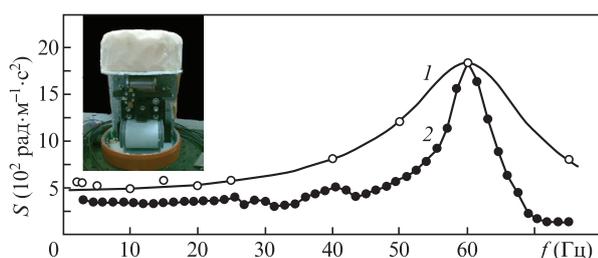


Рис.10. Фотография многовиткового волоконно-оптического интерферометрического акселерометра (на вставке) и амплитудно-частотные характеристики акселерометров с активным (1) и с пассивным (2) гомодинированием.

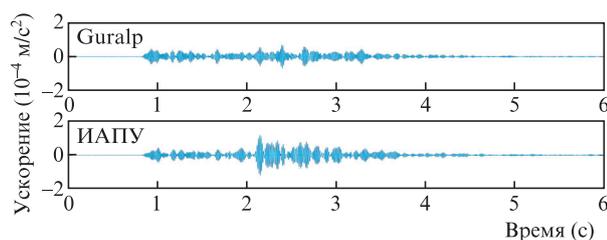


Рис.11. Осциллограмма сейсмического события на частоте 7 Гц, зарегистрированного форс-балансным акселерометром Guralp и волоконно-оптическим акселерометром ИАПУ ДВО РАН.

кабря 2017 г. у берегов Камчатки на глубине 64 км. Измерения производились на частоте 7 Гц с использованием стандартного форс-балансного акселерометра CMG-5T (Guralp Systems Ltd, Великобритания) и волоконно-оптического акселерометра, показанного на рис.10. Как видно из рис.11, чувствительность волоконно-оптического акселерометра практически в два раза превышает чувствительность широко используемых в геофизических измерениях стандартных форс-балансных акселерометров, что свидетельствует об их перспективности для геофизических применений.

Следует также отметить, что хотя активное гомодинирование сигналов в волоконно-оптическом акселерометре затрудняет его использование под водой, такие акселерометры могут успешно применяться для сейсмоакустического мониторинга океана в прибрежной зоне. Данная возможность была экспериментально подтверждена при регистрации НЧ акустических сигналов, создаваемых во время движения морских судов на удалении более 10 км от береговой полосы, на которой был установлен волоконно-оптический акселерометр [85, 86].

Использование пассивного гомодинирования сигналов волоконного интерферометра позволяет как стабилизировать его рабочие характеристики, так и отказаться от использования дополнительных электронных компонентов [80]. В ИАПУ ДВО РАН был разработан волоконно-оптический акселерометр, в котором оптическая схема пассивного гомодинирования основана на волоконном разветвителе  $3 \times 3$ , установленном на выходе волоконного интерферометра Маха–Цендера [87]. На рис.10 (кривая 2) представлена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) волоконно-оптического акселерометра на основе интерферометра Маха–Цендера с пассивным гомодинированием. На линейном участке АЧХ, в диапазоне частот 1–30 Гц, чувствительность акселерометра составила  $480 \text{ рад} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^2$ , что весьма близко к чувствительности волоконного акселерометра с активной стабилизацией рабочей точки. Важным достоинством схемы волоконного интерферометра с пассивным гомодинированием является отсутствие необходимости применения модулятора фазы излучения, электрической цепи обратной связи и дополнительного источника тока. Эти преимущества открывают широкие перспективы использования таких волоконных интерферометров для создания волоконно-оптических сейсмоприемников, предназначенных для работы в воде.

## 8. Роботизированная подводная лазерная очистка объектов, эксплуатируемых в морской среде, от биообрастателей

Биообращение – это естественный процесс, в ходе которого на поверхности корпусов судов, гидротехнических сооружений и измерительных приборов, находящихся в водной среде, начинают размножаться различные организмы. На данный момент известно более 4000 организмов, которые относят к биообрастателям [88]. Наросшие ниже ватерлинии судов ракушки и водоросли настолько тормозят судно, что дополнительный расход топлива иногда вырастает до 40%. Большой вес биообрастателей способен привести к авариям гидротехнических сооружений, а также к нарушению работы океанографических датчиков, предназначенных для непрерывного измерения та-

ких параметров, как механические напряжения, температура, акустическая чувствительность, растворенный кислород, мутность, pH, флуоресценция и др. [89].

Борьба с биообрастанием стоит чрезвычайно дорого и приводит к потере миллиардов долларов во всем мире. В настоящее время существуют три основных способа борьбы. Это использование специальных красок, содержащих убивающие биообрастателей биоциды, самополирующихся покрытий на основе силикона, затрудняющих закрепление биообрастателей на поверхности, и механическая подводная очистка. Поскольку все эти способы имеют серьезные недостатки, поиск эффективной, экологически чистой и безопасной технологии очистки поверхностей судов, гидротехнических сооружений и корпусов океанографических сенсоров от биообрастателей по-прежнему актуален.

Волоконные лазеры играют важную роль в обработке различных материалов, используемых в машиностроении и промышленности [90]. Одной из широко используемых технологий на основе волоконных лазеров является очистка поверхностей. Эта технология выгодно отличается от традиционных методов тем, что не требует использования расходных материалов, производится дистанционно, является экологически безопасной, в процессе обработки отсутствуют изнашивающиеся детали, а результат и степень очистки легко контролируются [91]. Именно эти достоинства послужили основанием для начала наших работ по развитию технологии лазерной подводной очистки поверхностей объектов от биообрастателей с применением лазерного излучения малой и средней мощности. В основе технологии лазерной очистки лежат процессы испарения или абляции органических, полимерных и оксидных пленок с поверхности материала под действием непрерывного или импульсного лазерного излучения [91].

В морских обрастаниях участвуют самые различные организмы, способные плотно прикрепляться к твердым поверхностям, находящимся под водой [92]. Последовательность развития биообрастателей обычно состоит из пяти основных стадий, начинающихся с адсорбции органических и неорганических макромолекул сразу после погружения объекта в водную среду и заканчивающихся прикреплением к поверхности более крупных морских беспозвоночных, таких как ракушки, мидии, макроводоросли и др. [93].

Нами была разработана технология роботизированной подводной лазерной очистки объектов от биообрастателей в воздушном потоке, создаваемом непосредственно в водной среде. Это потребовало выполнения комплекса исследований, связанных с изучением процесса взаимодействия лазерного излучения с разными типами обрастателей, с разработкой специальной конструкции облучателя и с выбором оптимального режима лазерной очистки [94–96]. Источниками излучения служили непрерывные итербиевые волоконные лазеры с регулируемой мощностью излучения в диапазоне 100–1000 Вт и длиной волны 1.06 мкм.

Были выполнены натурные эксперименты по определению видов биообрастателей, скорости обрастания поверхностей окрашенных и неокрашенных стальных и стеклопластиковых пластин и качества очистки пластин механическим и лазерным методами. Исследования таксономического состава сообществ биообрастателей показали, что обрастание начинается уже с первого месяца размещения пластин в морской среде. Причем если в первый месяц биообрастатели почти незаметны, то через 2–3 месяца они достигают значительного размера: 5–8 мм (рис.12). Такая шероховатость поверхности начинает негативно сказываться на гидродинамических характеристиках объектов.

Результаты экспериментальных исследований показали, что борьба с обрастанием объектов с помощью лазерного излучения с первой по четвертую стадии обрастания является достаточно эффективной, что иллюстрируется приведенными на рис.13 фотографиями. На этих стадиях обрастания для полной очистки поверхности достаточно небольшая мощность лазерного излучения: 50–300 Вт. В этом случае низкая мощность лазерного излучения, высокая скорость обработки поверхности ( $\sim 15 \text{ см}^2/\text{с}$ ) и возможность сохранения ее лакокрасочного покрытия гарантируют экономически выгодные решения при разработке технологии подводной очистки от биообрастателей.

Сравнительное исследование механических и лазерных способов удаления биообрастателей показало, что традиционная механическая очистка, как правило, нарушает лакокрасочное покрытие, удаляет лишь самые грубые наросты и после нее остается питательная среда (в виде тонкой пленки), пригодная для повторного закрепления и роста новых биообрастателей. Лазерная подводная очистка демонстрирует значительно лучшие резуль-

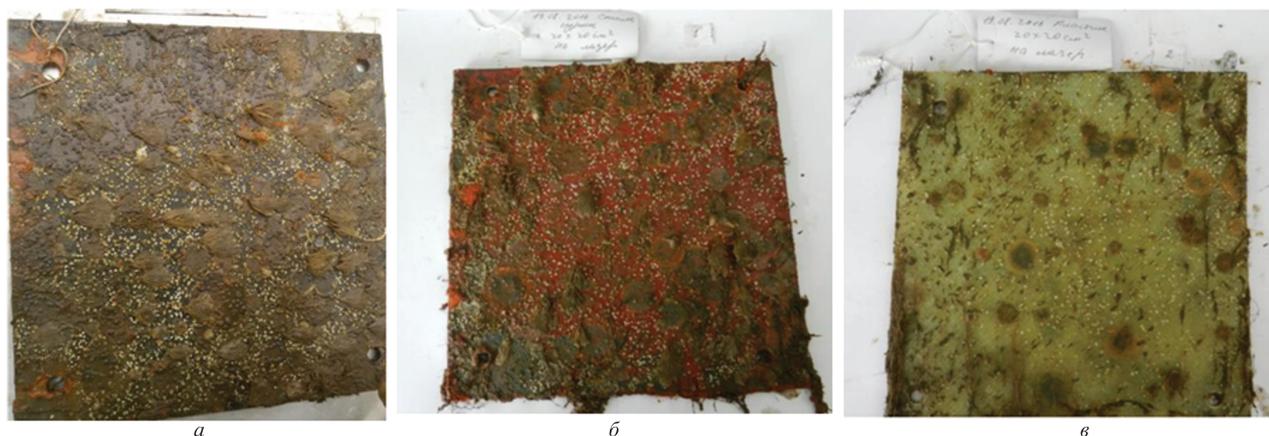


Рис.12. Фотографии неокрашенной (а) и окрашенной (б) стальных пластин, а также пластины из стеклопластика (в) после двухмесячного пребывания в воде Японского моря. Цветные варианты рис.12 и 13 приведены на сайте нашего журнала <http://www.quantum-electron.ru>.

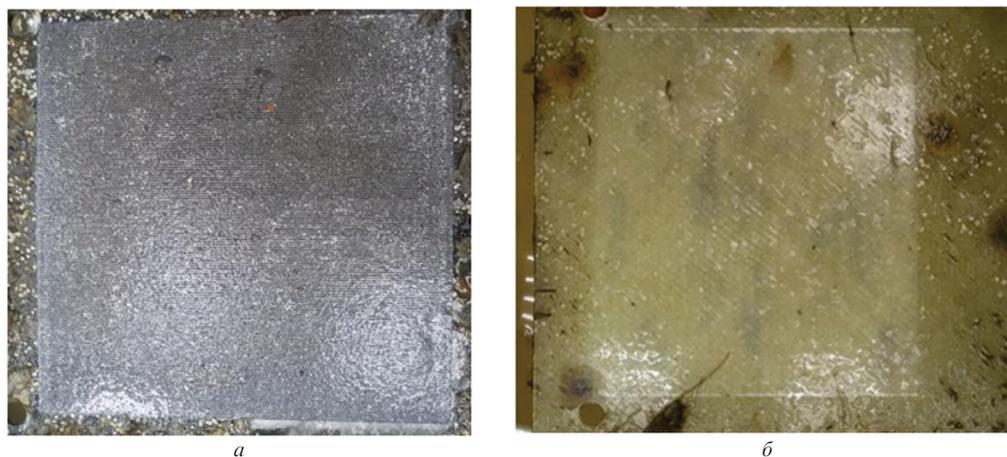


Рис.13. Фотографии неокрашенной стальной пластины (а) и пластины из стеклопластика (б) после очистки в водной среде от обрастателей лазерным излучением мощностью 100 Вт.

таты, позволяя практически полностью очистить поверхность. Однако в данном случае критическим параметром становится время между последующими процессами очистки. В случае длительного времени нахождения объекта в воде, т.е. при переходе к более поздней, пятой стадии обрастания, когда на поверхности формируются кальциевые домики баялянусов и червей, мощность лазерного излучения, необходимая для очистки поверхности, начинает возрастать практически в геометрической прогрессии (в зависимости от размеров биообрастателей) и может достигать 1000 Вт.

В итоге результаты проведенных исследований показали, что для оптимизации скорости подводной лазерной очистки от биообрастателей целесообразно проводить ее с периодичностью 1–2 месяца. При такой длительности нахождения объектов в морской среде наиболее трудноудаляемые с их поверхности кальциевые структуры обрастателей только начинают формироваться. Поэтому лазерное излучение небольшой мощности обеспечивает полное их удаление при сохранении лакокрасочного покрытия поверхности.

Результаты исследования процесса подводной лазерной очистки были положены в основу создания уникального роботизированного лазерного комплекса, в состав которого входят телеуправляемый подводный робот и иттербиевый волоконный лазер (рис.14), позволяющего

осуществлять подводную очистку от биообрастателей корпусов судов, горизонтально и вертикально ориентированных технических и гидротехнических объектов со скоростью 5.4 м<sup>2</sup>/ч на глубине до 10 м [97]. Разработанный комплекс оснащен системами видеонаблюдения, позволяющими дистанционно контролировать качество очистки и состояние поверхности объекта. Поскольку самым эффективным методом борьбы с обрастателями является только их физическое устранение, созданный нами роботизированный лазерный комплекс подводной очистки может стать одним из эффективных средств защиты приборов и систем подводного мониторинга от нежелательного воздействия биообрастания.

## 9. Заключение

Океан играет огромную роль в жизни человечества, однако наши знания о нем ограничены. Особую важность его мониторинг приобретает сейчас, когда Мировой океан, прибрежные и морские экосистемы претерпевают значительные изменения в результате растущих выбросов парниковых газов, загрязнения прибрежных зон, чрезмерного вылова рыбы и гидробионтов, развития прибрежных районов и роста населения. В стремлении понять и использовать этот уникальный мир исследователям океана приходится сталкиваться с множеством зна-

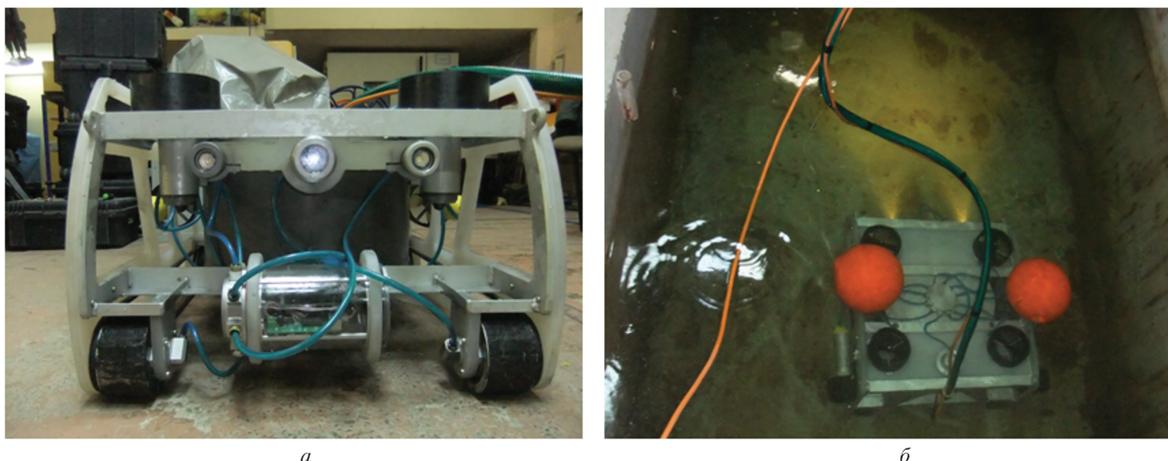


Рис.14. Фотографии роботизированного комплекса подводной лазерной очистки от биообрастателей (а) и процесс испытания комплекса в бассейне (б).

чительных проблем. Именно это стимулирует поиск новых методов и систем мониторинга океана, которые должны обеспечить помощь в изучении и освоении этого важного для человечества объекта. Применение фотоники для создания средств мониторинга океана открывает новые горизонты в создании эффективных средств извлечения наиболее полной информации о Мировом океане и его взаимодействии с окружающей средой. Изложенные в настоящем обзоре результаты исследований обобщают многолетний труд ученых и инженеров Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН, направленный на создание эффективных средств лидарного и оптического мониторинга атмосферы и поверхности океана, роботизированных лазерных методов для определения химического состава воды и донного грунта, лазерно-индуцированных флуоресцентных средств экологического мониторинга океана, на разработку высокочувствительных и помехозащищенных волоконно-оптических гидро- и сейсмоакустических средств дистанционного мониторинга океана, а также роботизированных средств защиты устройств подводного мониторинга от воздействия биообрастания. Главная задача этих исследований заключалась в обеспечении возможности получения качественной и точной измерительной информации практически в реальном масштабе времени, что в перспективе позволило бы нам получить более полную информацию о таком уникальном и необычайно важном объекте, каким является Мировой океан.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов ДВО РАН программы «Дальний Восток» (проект № 18-3-044) (разд.3), (проект № 18-5-080) (разд.6), Министерства науки и высшего образования (FZNS-2020-0003, проект № 0657-2020-0003) (разд.4), Российского научного фонда (проект № 19-12-00323) (разд.5), РФФИ (проект № 16-29-02082 оф\_м) и (проект № 16-05-0750 а) (разд.6).

- Measures R.M. *Laser Remote Sensing, Fundamental and Applications* (New York: John Wiley & Sons, 1984).
- Bunkin A.F., Voliak K.I. *Laser Remote Sensing of the Ocean. Methods and Applications* (New York: John Wiley&Sons, 2001).
- Першин С.М. *Лидар* (Большая Российская энциклопедия, 2011, т. 17, с. 451).
- Arshad M.R. *Indian J. Marine Sci.*, **38** (3), 267 (2009).
- <https://aeronet.gsfc.nasa.gov>.
- Chaikovskiy A., Ivanov A., Balin Yu., Elnikov A., Tulinov G., Plusnin I., Bukin O., Chen B. *Proc. SPIE*, **6160**, 616035 (2006).
- Сакерин С.М., Павлов А.Н., Букин О.А., Кабанов Д.М., Корниенко Г.И., Полькин В.В., Столярчук С.Ю., Турчинович Ю.С., Шмирко К.А., Майор А.Ю. *Оптика атмосферы и океана*, **23** (8), 691 (2010) [*Atmosph. Ocean. Opt.*, **24** (1), 64 (2011)].
- Афонин С.В., Энгель М.В., Майор А.Ю., Павлов А.Н., Столярчук С.Ю., Шмирко К.А., Букин О.А. *Оптика атмосферы и океана*, **23** (9), 811 (2010) [*Atmosph. Ocean. Opt.*, **24** (2), 198 (2011)].
- Долгий С.И., Бурлаков В.Д., Макеев А.П., Невзоров А.В., Шмирко К.А., Павлов А.Н., Столярчук С.Ю., Букин О.А. и др. *Оптика атмосферы и океана*, **26** (7), 547 (2013).
- Букин О.А., Павлов А.Н., Кульчин Ю.Н., Столярчук С.Ю., Шмирко К.А. *Оптика атмосферы и океана*, **21** (10), 884 (2008).
- Букин О.А., Нгуен Суан Ань, Павлов А.Н., Столярчук С.Ю., Шмирко К.А. *Физика атмосферы и океана*, **47** (5), 660 (2011) [*Izv. Atmosph. and Ocean. Phys.*, **47**, (5), 610 (2011)].
- Павлов А.Н., Столярчук С.Ю., Шмирко К.А., Букин О.А. *Оптика атмосферы и океана*, **25** (9), 788 (2012) [*Atmosph. Ocean. Opt.*, **26**, 126 (2013)].
- Андреев С.Ю., Афонин С.В., Бедарева С.А., Береснев Т.В., Горбаренко Е.В. и др. *Исследование радиационных характеристик аэрозоля в азиатской части*. Под ред. С.М.Сакерина (Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2012).
- Букин О.А., Салюк П.А., Кульчин Ю.Н., Шмирко К.А., Столярчук С.Ю., Бубновский А.Ю. *Оптика атмосферы и океана*, **20** (4), 341 (2007).
- Kaufman Y.J. *Nature*, **419**, 215 (2002).
- Pawlowicz R. *IEEE J. Oceanic Eng.*, **28** (4), 699 (2003).
- Aerial Observation of Oil spills at Sea* (IOGP Report 518, 2015).
- Konstantinov O.G., Pavlov A.N. *Proc. SPIE*, **8696**, 86960K (2012).
- Константинов О.Г., Павлов А.Н. *Оптика атмосферы и океана*, **25** (10), 902 (2012) [*Atmosph. Ocean. Opt.*, **26** (4), 293 (2013)].
- Кульчин Ю.Н., Букин О.А., Константинов О.Г. и др. *Оптика атмосферы и океана*, **25** (7), 633 (2012) [*Atmosph. Ocean. Opt.*, **25**, 446 (2012)].
- Константинов О.Г., Павлов А.Н. *Оптика атмосферы и океана*, **26** (1), 35 (2013). [*Atmosph. Ocean. Opt.*, **26** (4), 300 (2013)].
- Aleksanin A.I., Stopkin M.V., Kachur V.A. *Izv. Atmosph. Ocean. Phys.*, **53** (9), 1123 (2017).
- Серебряный А.Н. *Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана*, **26** (3), 285 (1990).
- Otremba Z., Piskozub J. *Opt. Express*, **11** (1), 2 (2004).
- Drozdowska V., Freda W., Baszanowska E., Rud K., Darecki M., Heldt J.R., Toczek H. *Eur. Phys. J.: Spec. Top.*, **222** (9), 2157 (2013).
- Шмирко К.А., Константинов О.Г., Павлов А.Н., Дубинкина Е.С. *Изв. РАН. Сер. Физика атмосферы и океана*, **53** (1), 107 (2017) [*Izv. Atmosph. Ocean Phys.*, **53** (1), 95 (2017)].
- Шмирко К.А., Константинов О.Г., Кульчин Ю.Н., Столярчук С.Ю., Павлов А.Н., Коренский М.Ю. *Изв. РАН. Сер. Физика атмосферы и океана*, **53** (3), 422 (2017) [*Izv. Atmosph. Ocean Phys.*, **53** (3), 373 (2017)].
- Metal Ions in Biological Systems. Vol. 44 – Biogeochemistry, Availability, and Transport of Metals in the Environment*. Ed by A.Sigel, H.Sigel, R.Sigel (Taylor & Francis Group, 2005).
- Smolyakov B.S., Ryzhikh A.P., Romanov R.E. *J. Hazardous Mater.*, **184**, 819 (2010).
- Pena-Vazquez E., Maneiro E., Perez-Conde C., Moreno-Bondi M.C., Costas E. *Microalgae Biosens. Bioelectron.*, **24** (12), 3538 (2009).
- Markina Z.V., Ayzdaycher N.A. *Hydrobiol. J.*, **46** (2), 49 (2010).
- Фадеев В.В., Доленко С.А., Доленко Т.А., Увенков Я.В., Филиппова Е.М., Чубаров В.В. *Квантовая электроника*, **27** (6), 571 (1997) [*Quantum Electron.*, **27** (6), 556 (1997)].
- Fadeev V.V., Gostev T.S., Gorbunov M.Y. *J. Biophoton.*, **5** (7), 502 (2012).
- Gamayunov E.L., Popik A.Y. *Biophysics (Pleiades Publi.)*, **60** (1), 113 (2015).
- Кульчин Ю.Н., Вознесенский С.С., Гамаюнов Е.Л., Коротенко А.А., Попик А.Ю., Майор А.Ю. *Оптика атмосферы и океана*, **26**, 40 (2013) [*Atmosph. Ocean. Opt.*, **26** (5), 432 (2013)].
- Voznesenskii S.S., Gamayunov E.L., Popik A.Yu., Korotenko A.A. *Instrum. Experiment. Techniq.*, **57** (3), 330 (2014).
- Ptushenko V.V., Karavaev V.A., Solntsev M.K., Tikhonov A.N. *Biophysics*, **58** (2), 228 (2013).
- Antal T.K., Matorin D.N., Levenko B.A., Kazimirko Yu.V., Gorunova V.B., Sapozhnikov V.V. *Moscow Univ. Biol. Bull.*, **16**, 25 (2000).
- Voznesenskiy S.S., Popik, A.Yu., Gamayunov E.L., Markina Zh.V., Orlova T.Yu. *Biophysics*, **61** (1), 73 (2016).
- Вознесенский С.С., Гамаюнов Е.Л., Попик А.Ю. Патент на изобретение, RU 2619640 C1 (2017).
- Gamayunov E., Voznesenskiy S., Popik A., in *Marine Science and Technology for Sustainable Development: Abstracts of the 26th International Conference of Pacific Congress on Marine Science and Technology (PACON-2019)* (Vladivostok: POI FEB RAS, 2019, p. 326).
- Védrine C., Leclerc J.C., Durrieu C., Tran-Minh C. *Biosens. Bioelectron.*, **18** (4), 457, (2003).
- Frense D., Müller A., Beckmann D. *Sens. Actuat. B: Chem.*, **51**, 1 (1998).
- Ефременко Е. Н., Холстов А.В., Воронова Е.Н., Конюхов И.В., Погосян С.И., Рубин А.Б. Патент на изобретение, RU 2426779 (2011).
- Nikolskaya A.B., Holstov A.V., Lyagin I.V., Mamedova F., Efremenko E.N., Varfolomeyev S.D., Emanuel N.M. *Intern. Sci. J. Alternat. Energy Ecology*, **4**, 95 (2012).
- Voznesenskiy S.S., Popik A.Yu., Gamayunov E.L., Orlova T.Yu., Markina Zh.V., Postnova I.V., Shchipunov Yu.A. *Eur. Bioph. J.*, **47**, 87 (2018).

47. Voznesenskiy S.S., Popik A.Y., Gamayunov E.L., Orlova T.Y., Markina Z.V., Kulchin Y.N., in *Biosensors Based on Micro-algae for Ecological Monitoring of the Aquatic Environment, Algae-Organisms for Imminent Biotechnology* (London: IntechOpen Limited, 2016).
48. Cremers D.A., Radziemski L.J. *Handbook of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy* (Wiley, 2013).
49. Huang J.-S., Lin K.-C. *J. Chinese Chem. Soc.*, **61** (1), 175 (2014).
50. Qiao S., Ding Y., Tian D., Yao L., Yang G. *Appl. Spectrosc. Rev.*, **50** (1), 1 (2015).
51. Ilyin A.A., Golik S.S. *Spectrochim. Acta—P. B Atomic Spectrosc.*, **87**, 192 (2013).
52. Golik S.S., Ilyin A.A., Babiy M.Yu., Biryukova Yu.S., Lisitsa V.V., Bukin O.A. *Plasma Sci. Technol.*, **17** (11), 975 (2015).
53. Голик С.С., Букин О.А., Ильин А.А., Соколова Е.Б., Колесников А.В., Бабий М.Ю., Кульчин Ю.Н., Гальченко А.А. *ЖПС*, **79** (3), 485 (2012) [*J. Appl. Spectrosc.*, **79** (3), 471 (2012)].
54. Singh J.P., Thakur S.N. *Laser-Induced Breakdown Spectroscopy* (Elsevier Science, 2007).
55. Ильин А.А., Голик С.С. *Письма ЖТФ*, **40** (6), 7 (2014) [*Tech. Phys. Lett.*, **40**, 234 (2014)].
56. Ильин А.А., Соколова Е.Б., Голик С.С., Букин О.А., Шмирко К.А. *ЖПС*, **78** (6), 921 (2011) [*J. Appl. Spectrosc.*, **78** (6), 861 (2012)].
57. Golik S.S., Ilyin A.A., Biryukova Yu.S., Babiy M.Yu., Proshchenko D.Yu., Borovsky A.V. *Proc. SPIE*, **10466**, 1046644 (2017).
58. Golik S.S., Mayor A.Yu., Proshchenko D.Yu., Ilyin A.A., Nagorniy I.G., Biryukova Yu.S., Babiy M.Yu., Golik N.N., Gevorgyan T.A., Lisitsa V.V., Vorovskiy A.V., Kulchin Yu.N. *Proc. SPIE*, **10461**, 1046114 (2017).
59. Bukin O., Proshchenko D., Chekhlenok, A., Golik S., Bukin I., Mayor A., Yurchik V. *Sensors (Basel, Switzerland)*, **18** (6), 1680 (2018).
60. Кацнельсон Б.Г., Петников В.Г. *Акустика мелкого моря* (М.: Наука, 1997, с.181).
61. Корякин Ю.А., Смирнов С.А., Яковлев Г.В. *Корабельная гидроакустическая техника. Состояние и актуальные проблемы* (СПб.: Наука, 2004, с. 409).
62. Wagner J.W., Spicer J. *J. Opt. Soc. Am. B*, **4**, 1316 (1987).
63. Josten G., Lüthy W., Weber H.P. *Appl. Phys. B*, **51** (6), 418 (1990).
64. Karhade O., Degertekin L., Kurfess T. *Opt. Lett.*, **34** (19), 3044 (2009).
65. Кульчин Ю.Н. *Распределенные волоконно-оптические измерительные системы* (М.: Физматлит, 2001, с. 273).
66. Kamshilin A.A., Romashko R.V., Kulchin Y.N. *J. Appl. Phys.*, **105** (3), 031101 (2009).
67. Di Girolamo S., Romashko R.V., Kulchin Y.N., Kamshilin A.A. *Opt. Commun.*, **283** (1), 128 (2010).
68. Romashko R.V., Di Girolamo S., Kulchin Y.N., Kamshilin A.A. *JOSA B*, **27** (2), 311 (2010).
69. Ромашко Р.В., Кульчин Ю.Н., Безрук М.Н., Ермолаев С.А. *Квантовая электроника*, **46**, 277 (2016) [*Quantum Electron.*, **46** (3), 277 (2016)].
70. Bezruk M.N., Ermolaev S.A., Kulchin Y.N., Romashko R.V. *Proc. SPIE*, **10176**, 1017614 (2016).
71. Ромашко Р.В., Безрук М.Н., Ермолаев С.А., Завестовская И.Н., Кульчин Ю.Н. *Кр. сообщ. физ. ФИАН*, **7**, 32 (2017) [*Bull. Lebedev Phys. Instit.*, **44** (7), 205 (2017)].
72. Aki K., Richards P. *Quantitative Seismology* (Sausalito: University Science Books U.S., 2009).
73. Bean T.P. et al. *Frontiers Marine Sci.*, **4**, 263 (2017).
74. Hoffman C., Giallorenzi T.G., Slater L.B. *Appl. Opt.*, **54**, 268 (2015).
75. Рыжов А.В., Хромоин А.К., Жгенти С.А., Запорожец Б.В. *Приборы и системы разведочной геофизики*, **19** (1), 40 (2007).
76. Yin S., Ruffin P.B., Yu F.T.S. *Fiber Optic Sensors* ( Boca Raton: CRC Press, 2008, p. 492).
77. Кузнецов В.М., Шехтман Г.А., Череповский А.В. *Технологии сейморазведки*, **1**, 74 (2013).
78. Каменев О.Т., Ромашко Р.В., Кульчин Ю.Н. *Лазерные приемники сейсмо- и гидроакустических сигналов* (Новосибирск: изд-во СО РАН, 2016, с.180).
79. Kamenev O.T., Kulchin Yu.N., Petrov Yu.S., Khiznyak R.V., Romashko R.V. *Sens. Actuat.*, **244**, 133 (2016).
80. Udd E, Spillman W.B. *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists* (Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons, 2011).
81. Tveten A.B., Dandridge A., Davis C.M., Giallorenzi T.G. *Electron. Lett.*, **16**, 854 (1980).
82. Кульчин Ю.Н., Каменев О.Т., Петров Ю.С., Колчинский В.А., Подлесных А.А. *Изв. вузов. Сер. Приборостроение*, **62** (3), 291 (2019) [*J. Instrum. Eng.*, **62** (3), 291 (2019)].
83. Кульчин Ю.Н., Каменев О.Т., Петров Ю.С., Ромашко Р.В., Колчинский В.А. *Изв. РАН. Сер. физич.*, **82** (5), 556 (2018) [*Bull. Rus. Acad. Sci.: Phys.*, **82** (5), 487 (2018)].
84. Jackson D.A., Priest R., Dandridge A., Tveten A. B. *Appl. Opt.*, **19** (17), 2926 (1980).
85. Kamenev O.T., Petrov Yu.S., Khiznyak R.V., Romashko R.V. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **737**, 012040 (2016).
86. Kamenev O.T., Kulchin Yu.N., Petrov Yu.S. *Proc. SPIE*, **10176**, 101760W (2016).
87. Kamenev O.T., Petrov Yu.S., Podlesnykh D.A., in *VII Intern. Conf. Photon. Information Optics* (КнЕ Energy & Physics, 2018, p. 388).
88. Yebra D. M., Kiil S., Dam-Johansen K. *Progr. Organ. Coat.*, **50**, 75 (2004).
89. Delauney L., Comp C., Lehaitre M. *Ocean Sci.*, **6**, 503 (2010).
90. Steen W., Mazumder J. *Laser Material Processing* (Springer, 2010, p. 558).
91. Вейко В.П., Смирнов В.Н., Чирков А.М., Шахно Е.А. *Лазерная очистка в машиностроении и приборостроении: Учебное пособие* (СПб: НИУ ИТМО, 2013, с. 103).
92. Delauney L., Compère C., Lehaitre M. *IEEE Proc. OCEANS 2009-EUROPE*, **10914987**, 1 (2019).
93. Чава А.И., Мокиевский В.О. *Вести газовой науки*, **4**(36), 149 (2018).
94. Кульчин Ю.Н., Звягинцев А.Ю., Субботин Е.П., Масленников С.И., Бегун А.А. *Вестник ДВО РАН*, **6**, 97 (2015).
95. Бегун А.А., Звягинцев А.Ю., Масленников С.И., Кульчин Ю.Н., Субботин Е.П. *Вода: химия и экология*, **10**, 33 (2016). [*Water: Chem. Ecol.*, **10**, 33 (2016)].
96. Жевтун И.Г., Кульчин Ю.Н., Субботин Е.П., Масленников С.И., Звягинцев А.Ю. *Коррозия: материалы, защита*, **4**, 34 (2018).
97. Быканова А.Ю., Костенко В.В., Львов О.Ю., Никитин А.И., Субботин Е.П., Костяно А.А. *Технические проблемы освоения Мирового океана*, **7**, 122 (2017).