

Ю.Н. КУЛЬЧИН, С.С. ВОЗНЕСЕНСКИЙ, О.Б. ВИТРИК,  
А.В. ДЫШЛЮК, О.Т. КАМЕНЕВ, А.А. КУЧМИЖАК, А.Ю. МАЙОР,  
А.И. НИКИТИН, А.Н. ПАВЛОВ, Р.В. РОМАШКО, Е.П. СУББОТИН

## Научная школа лазерной физики Института автоматики и процессов управления ДВО РАН

*Под научной школой традиционно понимается научное сообщество, имеющее общие взгляды и идеи, сформированные под влиянием лидера. В Институте автоматики и процессов управления ДВО РАН сложилась и на протяжении многих лет динамично развивается единственная в ДФО научная школа лазерной физики. В статье освещаются основные этапы формирования научной школы. На конкретных примерах иллюстрируются научная новизна и практическая значимость проводимых коллективом научной школы исследований.*

*Ключевые слова: лазерная физика, лидары, лидарно-спутниковые комплексы, лазерная спектроскопия, нелинейная оптика, волноводные сенсоры, оптические сенсоры, плазмоны, экситоны, биофотоника.*

**Scientific school of laser physics of the Institute of Automation and Control Processes FEB RAS.**  
Yu.N. KULCHIN, S.S. VOZNESENSKY, O.B. VITRIK, A.V. DYSHLYUK, O.T. KAMENEV, A.A. KUCHMIZHAK,  
A.Yu. MAJOR, A.I. NIKITIN, A.N. PAVLOV, R.V. ROMASHKO, E.P. SUBBOTIN (Institute of Automation and  
Control Processes, FEB RAS, Vladivostok).

*A scientific school is traditionally understood as a scientific community that has common views and ideas formed under the influence of a leader. The Institute of Automation and Control Processes of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences has developed and has been developing dynamically for many years the only Scientific School of Laser Physics in the Far Eastern Federal District. This article covers the main stages of the formation of a scientific school. A number of examples illustrate the scientific novelty and significance of the research carried out by the scientific school team.*

*Key words: laser physics, lidars, lidar-satellite complexes, laser spectroscopy, nonlinear optics, waveguide sensors, optical sensors, plasmons, excitons, biophotonics.*

Время стремительно и неуклонно движется вперед, и те события, которые еще вчера казались произошедшими совсем недавно, сегодня уже становятся историей. Поэтому пока в памяти участников событий не стерлись события и факты, хотелось бы

---

\*КУЛЬЧИН Юрий Николаевич – академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, научный руководитель, ВОЗНЕСЕНСКИЙ Сергей Серафимович – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, ВИТРИК Олег Борисович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией, ДЫШЛЮК Антон Владимирович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, КАМЕНЕВ Олег Тимурович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий сектором, КУЧМИЖАК Александр Александрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, МАЙОР Александр Юрьевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник, НИКИТИН Александр Иванович – старший инженер, ПАВЛОВ Андрей Николаевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией, РОМАШКО Роман Владимирович – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, директор института, СУББОТИН Евгений Петрович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник (Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток). \*E-mail: kulchin@iacp.dvo.ru

рассказать о том, как происходило становление первой и пока единственной на Дальнем Востоке России научной школы лазерной физики.

Начать, по-видимому, следует с 1971 г., когда директором Физического института АН СССР им. П.Н. Лебедева (ФИАН СССР), лауреатом Нобелевской премии академиком Н.Г. Басовым, ректором Московского инженерно-физического института (МИФИ) профессором В.Г. Кирилловым-Угрюмовым и заведующим кафедрой физики твердого тела и квантовой радиофизики профессором того же института Ю.А. Быковским на базе МИФИ совместно с ФИАН СССР был основан Специальный факультет физики (в настоящее время – Высшая школа физиков (ВШФ) им. Н.Г. Басова НИЯУ МИФИ). Основной целью ВШФ на протяжении всего времени ее существования была подготовка для региональных НИИ и университетов инженеров-физиков с глубокими знаниями высшей математики, теоретической и экспериментальной физики, способных решать актуальные проблемы современной науки. В Высшую школу физиков на конкурсной основе зачислялись и зачисляются студенты третьего или четвертого курсов физических, физико-математических, технических факультетов различных вузов бывшего СССР, а ныне России и ближнего зарубежья, проявившие склонность и способность к научно-исследовательской работе. В 1973 г. три студента физического факультета Дальневосточного государственного университета – О.А. Букин, Ю.Н. Кульчин и В.К. Левченко – были отобраны для прохождения обучения в ВШФ. В 1976 г. они успешно окончили Московский инженерно-физический институт по направлению «квантовая радиофизика» (фото 1) и вернулись во Владивосток.

Следует отметить, что в начале 70-х годов создается Дальневосточный научный центр АН СССР и формируются новые академические институты на Дальнем Востоке. Двое из выпускников ВШФ, Ю.Н. Кульчин и В.К. Левченко, были распределены на работу в Отдел систем искусственного интеллекта (ОСИИ) Института автоматики и процессов управления (ИАПУ) ДВНЦ АН СССР, создателем и руководителем которого был профессор Ф.Г. Старос (фото 2). О.А. Букин был направлен в Отдел квантовой океанологии Тихоокеанского океанологического института ДВНЦ АН СССР (руководитель – профессор У.Х. Копвиллем). Позднее научные пути этих выпускников ВШФ то пересекались, то снова расходились, но они всегда поддерживали деловые контакты.

Ф.Г. Старос, выдающийся исследователь в области микроэлектроники, поставил перед физиками ОСИИ ИАПУ задачу – разработать физические и технологические основы



Фото 1. Ю.Н. Кульчин (2-й слева) и О.А. Букин (5-й слева) после защиты дипломных проектов в МИФИ. Дипломников поздравляют академик Н.Г. Басов и профессор Ю.А. Быковский (февраль 1976 г.). Здесь и далее фото из архива ИАПУ ДВО РАН



Фото 2. Шефская помощь селу. Сотрудники ОСИИ ИАПУ ДВНЦ АН СССР на уборке картофеля в с. Новоселище. Слева направо: В.К. Левченко, В.А. Баландин, Ю.Н. Кульчин, Т.А. Розовская (1976 г.)

создания трехмерной микроэлектронной кремниевой матрицы, которая была бы способна обеспечить значительное увеличение скорости и объема вычислительных операций, так необходимых для развития систем искусственного интеллекта. На тот момент эта задача не имела решения в мире, так как была сопряжена с множеством проблем. Одна из них заключалась в поиске решений по обеспечению вертикальных связей между слоями микроэлектронной кремниевой матрицы, поскольку обычная связь, основанная на использовании металлических проводников, не могла быть реализована. В МИФИ дипломная работа Ю.Н. Кульчина была посвящена исследованиям в области интегральной оптики (абсолютно нового в те годы научного направления), основу которой составляют оптические волноводы и волноводные функциональные элементы, размер которых в то время был сопоставим с размером элементов кремниевых интегральных схем. Поэтому после многочисленных обсуждений с Ф.Г. Старосом возникло предположение, что такую гальванически защищенную межслойную связь элементов можно обеспечить, используя фотоны вместо электронов [5, 19]. Насколько революционной была эта идея, можно судить по тому, что только через 6 лет после нашей первой открытой публикации учеными США были сформулированы основы аналогичного подхода [62] и лишь спустя 30 лет появились работы по частичной практической реализации межслойных связей с использованием элементов фотоники. Но мы тогда были полны энтузиазма и не видели причин, почему это нельзя осуществить. Ю.Н. Кульчиным были выполнены предварительные теоретические расчеты, обосновывающие принципы создания элементной базы для обеспечения фотонной связи между слоями матрицы. Используя научные контакты с МИФИ и ФИАН АН СССР, Ю.Н. Кульчин создал слоистые планарные структуры и выполнил первые экспериментальные исследования эффективности вертикальной связи слоев микросхем. Данные эксперименты показали вполне обнадеживающие результаты [5] и позволили по-новому взглянуть на «многослойный 3D куб». В этом «многослойном 3D кубе», наряду с организацией межслойных связей, было предложено использовать световедущие слои для выполнения определенных вычислительных операций с использованием фотонов, что повышало эффективность работы всей системы. Свои исследования Ю.Н. Кульчин продолжил в аспирантуре МИФИ под руководством профессора Ю.А. Быковского (декана ВШФ и заведующего кафедрой физики твердого тела и квантовой радиофизики) и д.ф.-м.н. В.Л. Смирнова.

Ю.Н. Кульчин успешно окончил аспирантуру в 1982 г., но из-за расформирования ОСИИ после смерти Ф.Г. Староса не вернулся в ИАПУ ДВНЦ АН СССР, а перешел работать на кафедру физики Дальневосточного политехнического института (ДВПИ), которую возглавлял доцент, впоследствии доктор физико-математических наук, профессор В.В. Зауткин. На кафедре Ю.Н. Кульчиным была создана лаборатория оптоэлектроники. Первыми ее сотрудниками стали В.Ф. Обух и О.Б. Витрик, достаточно быстро защитившие кандидатские диссертации (фото 3). Продолжать научные исследования в прежнем русле было уже невозможно: деятельность лаборатории необходимо было привязать к научной тематике ДВПИ.

В то время ректором ДВПИ был доктор технических наук, профессор Б.Ф. Титаев, а ДВПИ являлся ведущей организацией Минвуза РСФСР по океанологическим исследованиям, возглавляя научно-техническую программу «Мировой океан». При ДВПИ было создано Конструкторское бюро «Дальнее», которое стало в СССР одним из лидеров по разработке телеуправляемых подводных аппаратов. Руководил конструкторским бюро кандидат физико-математических наук, впоследствии доктор физико-математических наук, профессор В.И. Короченцев, известный специалист в области гидроакустики. Исследования лаборатории оптоэлектроники были ориентированы на разработку высокочувствительных волоконно-оптических гидрофонов и оптических процессоров для обработки их сигналов. В результате этих исследований сформировалось одно из главных направлений научной школы – волноводные сенсоры. После того как ректором ДВПИ стал доктор технических наук, профессор Н.Г. Храпатый, профессионал, интеллигент, энтузиаст, человек неукротимой энергии, лаборатория оптоэлектроники получила значительный импульс в своем развитии: она стала участником Научно-технической программы «Океанотехника», произошло ее укрепление штатными научными сотрудниками, расширилась тематика лаборатории, появилось научное направление «Распределенные волоконно-оптические измерительные сети». По этому направлению научная школа лазерной физики ИАПУ ДВО РАН является сегодня мировым лидером.

Во время работы в ДВПИ Ю.Н. Кульчину удалось направить для продолжения обучения в ВШФ МИФИ–ФИАН ряд студентов факультета радиоэлектронного приборостроения ДВПИ. Некоторые из них после окончания МИФИ возвратились во Владивосток и

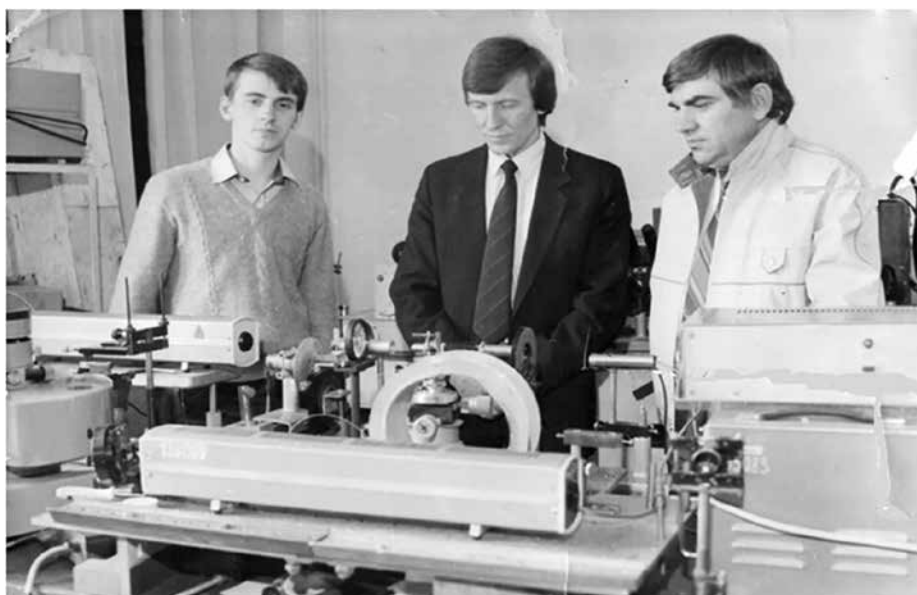


Фото 3. Первые сотрудники лаборатории оптоэлектроники ДВПИ (1986 г.). Слева направо: О.Б. Витрик, к.ф.-м.н. Ю.Н. Кульчин, В.Ф. Обух



Фото 4. Сотрудники лаборатории оптоэлектроники в кабинете проректора по научной работе ДВГТУ Ю.Н. Кульчина (1999 г.). Сидят слева направо: д.ф.-м.н., профессор О.Б. Витрик, академик РАН д.ф.-м.н., профессор Ю.Н. Кульчин, д.ф.-м.н., профессор О.Т. Каменев, м.н.с. Е.В. Пискунов, д.т.н., профессор Е.В. Закасовская. Стоят слева направо: к.т.н. А.Ю. Ким, к.ф.-м.н. А.В. Панов; к.ф.-м.н. О.В. Кириченко, член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н., профессор Р.В. Ромашко, д.т.н., профессор И.В. Денисов, к.т.н. Ю.В. Петров

составили костяк научной школы лазерной физики. Все они стали учениками Ю.Н. Кульчина и талантливыми учеными, которыми он не перестает гордиться. Одним из первых после окончания ВШФ вернулся в ДВПИ О.Б. Витрик. Ныне О.Б. Витрик – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией ИАПУ ДВО РАН. О.Т. Каменев – доктор физико-математических наук, профессор, заведует сектором ИАПУ ДВО РАН. Р.В. Ромашко стал доктором физико-математических наук, профессором, членом-корреспондентом РАН, сегодня руководит ИАПУ ДВО РАН.

После восстановления в 1987 г. в СССР института докторантуры Ю.Н. Кульчин продолжил работу в качестве очного докторанта МИФИ под руководством профессора Ю.А. Быковского, при этом оставался руководителем лаборатории оптоэлектроники в ДВПИ.

После успешной защиты докторской диссертации в 1991 г. Ю.Н. Кульчин возвратился в ДВПИ. В тот период тематика лаборатории пополнилась направлением, связанным с разработкой интеллектуальных измерительных систем, основанных на использовании нейронных сетей, в том числе оптических, для обработки сигналов волоконно-оптических измерительных систем. Практически сразу после возвращения Ю.Н. Кульчина в ДВПИ ректором института становится доктор технических наук, профессор Г.П. Турмов, замечательный ученый, прекрасный организатор и человек широкой души. Г.П. Турмов пригласил Юрия Николаевича на должность проректора по научной работе. Это было время больших перемен, когда ДВПИ перерождался в Дальневосточный государственный технический университет (ДВГТУ). У лаборатории появились новые возможности для развития и установления международных связей. Именно это позволило развить еще одно новое научное направление, связанное с созданием адаптивных оптических сенсоров, в основе которых лежат динамические голограммы. Перспективность этого направления обусловлена возможностью обеспечения работы высокоточных интерферометрических сенсоров в реальных условиях окружающей среды без дополнительной защиты.

В 1999 г. коллективом лаборатории оптоэлектроники (фото 4) была организована первая Азиатско-Тихоокеанская конференция «Фундаментальные проблемы опто- и микроэлектроники» (APCOM), которая вот уже на протяжении 20 лет регулярно проводится в разных странах АТР (фото 5).



Фото 5. Участники конференции APCOM в г. Далянь, КНР (2012 г.)

Конец 90-х годов прошлого столетия ознаменовался расширением научных связей лаборатории с институтами ДВО РАН. Директор Института автоматики и процессов управления ДВО РАН академик В.П. Мясников, известный ученый-механик, предложил Ю.Н. Кульчину создать в институте лабораторию прецизионных оптических методов измерений. Перед лабораторией была поставлена задача разработать высокоточные измерительные средства для контроля деформации протяженных объектов. В результате в институте стало развиваться еще одно научное направление – разработка протяженных волоконно-оптических сенсоров. К этому времени приток во Владивосток выпускников из университетов Москвы и Санкт-Петербурга иссяк. Недостаток высокопрофессиональных специалистов для обеспечения развиваемых научных направлений было решено компенсировать за счет местных кадров. При поддержке центральных вузов (МИФИ, МЭИ, ЛЭТИ) в ДВГТУ была открыта кафедра оптической и квантовой электроники и создан свой диссертационный совет по защите кандидатских и докторских диссертаций. Тогда же научная школа лазерной физики получила всероссийское признание.

В 2003 г. Ю.Н. Кульчин был избран членом-корреспондентом РАН, а через год председатель ДВО РАН академик В.И. Сергиенко, выдающийся ученый в области физической химии, пригласил Ю.Н. Кульчина на должность заместителя председателя ДВО РАН. В 2005 г. Ю.Н. Кульчин избран директором ИАПУ ДВО РАН, которым руководил до 2019 г. Лаборатория оптоэлектроники в полном составе из ДВГТУ была переведена в ИАПУ ДВО РАН. Это открыло новые возможности для развития молодой научной школы. Были созданы два новых подразделения – лаборатория физических методов мониторинга природных и техногенных объектов и лаборатория лазерных методов исследования вещества, а позднее – лаборатория новых функциональных материалов фотоники. Были организованы центры коллективного пользования научным и технологическим оборудованием «Лазерные методы исследования конденсированных сред, биологических объектов и мониторинга окружающей среды» и «Лазерные технологии», что позволило установить тесные контакты с научно-исследовательскими институтами и промышленными предприятиями России. Для подготовки специалистов и научных кадров в Дальневосточном федеральном университете была открыта базовая кафедра фотоники и цифровых лазерных технологий.

По приглашению Ю.Н. Кульчина в институт пришли работать прекрасные ученые доктора физико-математических наук, профессора О.А. Букин, А.В. Безвербный, В.П. Дзюба, А.Н. Павлов и их ученики. В созданных в ИАПУ ДВО РАН диссертационных советах защитили докторские диссертации Р.В. Ромашко, А.Ю. Майор, С.С. Вознесенский,

Е.В. Закасовская, возглавившие после этого новые научные направления исследований. Состоялись и защиты кандидатских диссертаций многими молодыми сотрудниками научной школы. В 2016 г. Р.В. Ромашко был избран членом-корреспондентом РАН. В результате научная школа лазерной физики значительно выросла по своему количественному и качественному составу и получила заслуженное признание отечественного и международного научного сообщества (фото 6–8).

Сегодня, в год празднования 50-летнего юбилея Института автоматики и процессов управления ДВО РАН, можно сказать, что сформированная на его базе научная школа лазерной физики находится на подъеме в своем развитии. В рамках научной школы успешно развиваются следующие научные направления:

- 1) лидары и лидарно-спутниковые комплексы;
- 2) лазерная спектроскопия;
- 3) взаимодействие лазерного излучения с веществом;
- 4) волноводные сенсоры;
- 5) адаптивная оптика;
- 6) наноплазмоника;
- 7) фотоника наносистем;
- 8) биофотоника.

Наличие в научной школе большого числа высококлассных специалистов сделало сегодня возможным развернуть широким фронтом междисциплинарные научные исследования, объединяя потенциалы разнопрофильных институтов ДВО РАН и университетов России. Это позволяет обеспечивать лидерство и динамичное развитие научной школы лазерной физики ИАПУ ДВО РАН за счет выполнения междисциплинарных исследований, в которых упор делается на сочетание современных достижений фотоники с информатикой,



Фото 6. Посещение ИАПУ ДВО РАН нобелевским лауреатом, вице-президентом РАН, академиком РАН Ж.И. Алферовым (в центре) и директором ИФП СО РАН членом-корреспондентом РАН А.В. Латышевым (крайний слева)



Фото 7. Визит в ИАПУ ДВО РАН вице-президента РАН академика РАН Г.А. Месяца (в центре), председателя Совета РФФИ академика РАН В.Я. Панченко (крайний слева) и председателя ДВО РАН академика РАН В.И. Сергиенко (третий слева)



Фото 8. Подписание соглашения о сотрудничестве ИАПУ ДВО РАН с Технологическим университетом г. Далянь, КНР (2011 г.)

акустикой, океанологией, экологией, робототехникой, аддитивными технологиями, новыми материалами, биотехнологией и т.д. Ниже проиллюстрируем кратко некоторые из этих достижений.

Океан, атмосфера и литосфера – три основных звена глобальной климатической системы Земли. Юг Приморского края – именно то место, где наиболее ярко проявляются взаимосвязь и взаимообусловленность процессов, протекающих в каждом из этих звеньев. В связи с этим в числе главных приоритетов научной школы лазерной физики ИАПУ ДВО РАН находятся исследования динамических процессов в океане и атмосфере, а также изучение процессов трансграничного переноса в атмосфере методами лазерного зондирования.

Свойства атмосферного аэрозоля и его состав напрямую связаны со свойствами подстилающей поверхности, суши и морской поверхности. При этом аэрозоль, переносимый воздушными потоками на большие расстояния, способен менять состав почвы и морской воды в районах его осаждения. Влияние атмосферного аэрозоля на климат и экологическое состояние атмосферы и океана изучается с помощью комплекса активных и пассивных методов дистанционного зондирования, к которым относится лидарное, фотометрическое и спутниковое зондирование. Лидарная станция ИАПУ ДВО РАН (фото 9) входит в состав лидарной сети стран СНГ, объединяющей 7 станций на пространстве от Минска до Владивостока. Данная сеть предназначена для изучения пространственного разнообразия свойств атмосферного аэрозоля и построения глобальных аэрозольных моделей атмосферы [9].

Изучение свойств атмосферного аэрозоля в рамках морских экспедиций позволило установить закономерности его пространственной и временной изменчивости [58]. Высокие значения аэрозольной оптической толщи обусловлены выносами континентального аэрозоля, преобладающими источниками которого являются аридные и индустриальные



Фото 9. Лидарная станция ИАПУ ДВО РАН





Фото 10. Фрагмент фемтосекундной лазерной установки для изучения процессов взаимодействия ультракоротких импульсов лазерного излучения с различными средами

районы сопредельного Китая. Существенная роль в трансграничном и даже трансконтинентальном переносе аэрозоля из пустыни Такла-Макан (северо-запад Китая) принадлежит субтропическому струйному течению, ядро которого расположено на высоте 11–13 км. Как правило, осаждение пылевого аэрозоля в морские воды сопровождается последующими вспышками цветения микроводорослей [4], поскольку осаждаемые частицы содержат минеральные удобрения и наночастицы оксидов железа, являющиеся для планктона кормовой базой. Именно это приводит к «красным» приливам и экологическим катастрофам в океане. Время и место возникновения таких явлений можно прогнозировать, используя результаты совместных лидарных и спутниковых измерений. На основании комплекса выполненных исследований по лидарной локации атмосферного аэрозоля нами разработан метод прогноза морских экологических катастроф.

Ключевым элементом системы обеспечения жизнедеятельности экосистем прибрежных акваторий являются динамические процессы, выполняющие функции очищения и вентиляции вод. Для регистрации динамических характеристик морской поверхности, картирования органических пленок на морской поверхности и контроля судоходства нами совместно с Тихоокеанским океанологическим институтом ДВО РАН разработана поляризационная сканирующая видеосистема. Будучи установленной на высоком берегу или на квадрокоптере, эта видеосистема позволяет без труда наблюдать динамику мелкомасштабных морских вихрей, внутренних волн и определять скорость и направление приповерхностного ветра [11]. Выполненные экспериментальные исследования убедительно продемонстрировали возможность обнаружения пленок разлива нефти на морских акваториях по оптическим изображениям поверхности моря в поляризованном свете. Дополнение поляризационной системы флуоресцентным лидаром позволяет проводить классификацию химического состава нефтяных пленок по изменению спектра флуоресценции [14].

К приоритетным направлениям нашей деятельности относятся также изучение процессов взаимодействия мощного фемтосекундного лазерного излучения с веществом (фото 10) и разработка методов экспресс-анализа химического состава газообразных, жидких и твердых сред.

В основе большинства экспресс-методов исследования материалов и окружающей среды лежат лазерно-индуцированная флуорометрия (ЛИФ) и лазерно-индуцированная спектроскопия (ЛИС).

Метод ЛИФ был использован для анализа флуорофоров – пигментов растений и водорослей (хлорофиллов, каротиноидов, фикобилинов и других органических соединений). Нами разработаны принципы и конструкция мобильного двухканального проточного лазерного флуориметра, который позволяет в реальном времени осуществлять контроль пигментов фитопланктона и растворенного в морской воде органического вещества непосредственно в процессе движения судна [20]. Данный прибор был успешно использован для мониторинга водной среды побережья России от Восточной Арктики до Японского моря, а также Восточно-Китайского моря и вокруг Антарктиды [59]. Впоследствии совместно с Морским государственным университетом (г. Владивосток) был разработан ЛИФ для подводного необитаемого аппарата обследовательского класса для изучения *in situ* активности фитопланктона, растворенного органического вещества и органической компоненты донных отложений на глубинах до 100 м [22].

Метод ЛИС сегодня широко используется в промышленности для элементного анализа твердого вещества. Обладая такими преимуществами, как отсутствие необходимости пробоподготовки, охват широкого ряда анализируемых химических элементов, экспрессность, хорошая воспроизводимость результатов, высокая чувствительность и возможность проведения анализа *in situ*, он оказался практически неприменим для анализа жидкостей, газов и аэрозолей вследствие высокой зашумленности сигнала. В ходе наших исследований было показано, что использование лазерных импульсов фемтосекундной длительности для возбуждения плазмы оптического пробоя на поверхности образцов и введение оптимальных параметров временной селекции оптических сигналов позволяют значительно повысить разрешающую способность метода ЛИС [6, 32, 35].

Совместно с Дальневосточным федеральным университетом нами был разработан ЛИС-спектрометр для телеуправляемого подводного необитаемого аппарата обследовательского класса, позволяющий производить *in situ* исследования химического состава морской воды и донных отложений на глубинах до 100 м с высокой точностью (фото 11). Аппарат прошел успешные испытания на акватории Амурского залива [18].



Фото 11. Телеуправляемый подводный аппарат, оснащенный ЛИС-спектрометром для анализа химического состава морской воды и донных отложений



Фото 12. Судовой мобильный лазерный комплекс с волоконно-оптическим погружаемым модулем для экологического мониторинга

Одним из перспективных современных методов определения химического состава атмосферных аэрозолей является метод филаментно-индуцированной эмиссионной спектроскопии. В основе данного метода лежит явление филаментации ультракоротких лазерных импульсов, при котором в атмосфере достигается плотность световой мощности до  $5 \times 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>. Данной плотности мощности лазерного излучения оказывается достаточно для возбуждения электронных переходов в атомах и молекулах воздушной среды и фазовой самомодуляции импульса, что приводит к значительному расширению его спектрального состава. Такая технология чирпирования фемтосекундного лазерного излучения позволяет управлять пространственным положением области филаментации пучка и генерировать плазму филаментов на значительных расстояниях в атмосфере [2]. Сегодня нами ведутся исследования этого метода применительно к возможности анализа состава водного аэрозоля атмосферы с целью определения его происхождения. Изучаются также возможности этого метода для исследования органических материалов.

Экологическое благополучие морских и пресноводных акваторий в значительной степени определяется видовым составом и состоянием обитающих в воде организмов. Поэтому на протяжении ряда лет мы занимаемся разработкой методов и средств мониторинга экологического состояния океанических вод на основе анализа фотоиндуцированной биолюминесценции водных микроорганизмов как природных индикаторов содержания в водной среде тяжелых металлов, химических соединений и растворенных газов. Нами было доказано, что у водорослей разных отделов среды обитания наблюдаются статистически достоверные различия спектров лазерно-индуцированной флуоресценции. В результате был разработан метод определения видового состава микроводорослей, принадлежащих к разным отделам среды обитания, основанный на исследовании температурной зависимости частотных и амплитудных параметров ЛИФ [67]. Также было установлено, что разные виды микроводорослей по-разному реагируют на содержащиеся в воде ионы тяжелых металлов и присутствие в водной среде неорганических и органических веществ, что проявляется в индуцируемых ими спектрах ЛИФ [64]. Для использования разработанных методов в реальных морских условиях создан судовой мобильный лазерный комплекс с волоконно-оптическим погружаемым модулем, который служит многофункциональной платформой (фото 12). На ее основе возможно создание различных оптоволоконных измерительных систем для выполнения научных исследований и экологического мониторинга [63].

Комплекс предназначен для мониторинга в реальном времени пространственного распределения растворенных в морской воде микроводорослей фитопланктона, хлорофилла-*a*, органических и минеральных веществ с целью осуществления экологического контроля, построения прогнозов продуктивности морских акваторий, поиска месторождений углеводородов и выявления метановой активности донной поверхности. Благодаря автоматизации процесса измерения и последующего анализа спектра флуоресценции время профилирования толщи воды на глубину 100 м не превышает 30 мин.

В настоящее время нами совместно с Институтом химии ДВО РАН и Национальным научным центром морской биологии ДВО РАН ведутся комплексные исследования по созданию биосенсоров на основе микроводорослей, предназначенных для систем анализа и контроля присутствия неорганических и органических веществ в воде, а также для выполнения экспресс-тестов с целью обнаружения ионов тяжелых металлов и газов в исследуемых средах (фото 13). При этом прежде всего решаются две главные задачи – сохранение жизнеспособности иммобилизованных в матрицы микроводорослей и изучение их реакции на внешние воздействия [66].

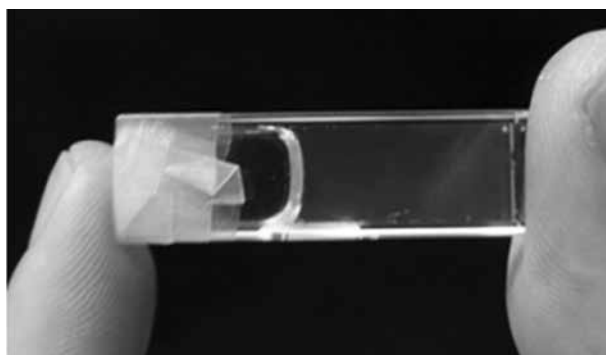


Фото 13. Вид биосенсора на основе микроводорослей, иммобилизованных в силикатную матрицу

В области создания оптических и нелинейно-оптических гетерогенных структур с пространственной модуляцией оптических характеристик для создания базовых компонентов фотоники нами впервые обнаружен и исследован эффект обратимого изменения фотоиндуцированного коэффициента поглощения в нанокompозите на основе квантовых точек сульфида кадмия, внедренных в оптически прозрачную силикатную матрицу [65]. Обнаруженный эффект (фото 14) открывает возможности создания полностью оптических систем управления лазерным излучением [47].

Другим направлением управления локальной интенсивностью лазерного излучения является использование эффекта «фотонной наноструи» – протяженной локализации оптического излучения, возникающей при взаимодействии лазерного излучения с диэлектрической частицей, размер которой соизмерим с длиной волны падающего излучения. Это позволяет на порядок повысить чувствительность оптических сенсоров газовых и водных сред и практически вплотную приблизиться к чувствительности методов «традиционной» аналитической химии, сохранив экспрессность анализа [61].

Разработанные методы возбуждения и регистрации сенсорного отклика обеспечивают беспрецедентно высокую чувствительность метода [18]. Нами синтезирован широкий набор хемочувствительных рецепторов, что позволяет создать оптические сенсоры разнообразных загрязнителей окружающей среды, газов-метаболитов, ионов металлов и простых биологических молекул.

Стоит отметить, что оптическая сенсорика является лишь одной из частных областей применения «фотонных наноструй». Это явление протяженной локализации падающего

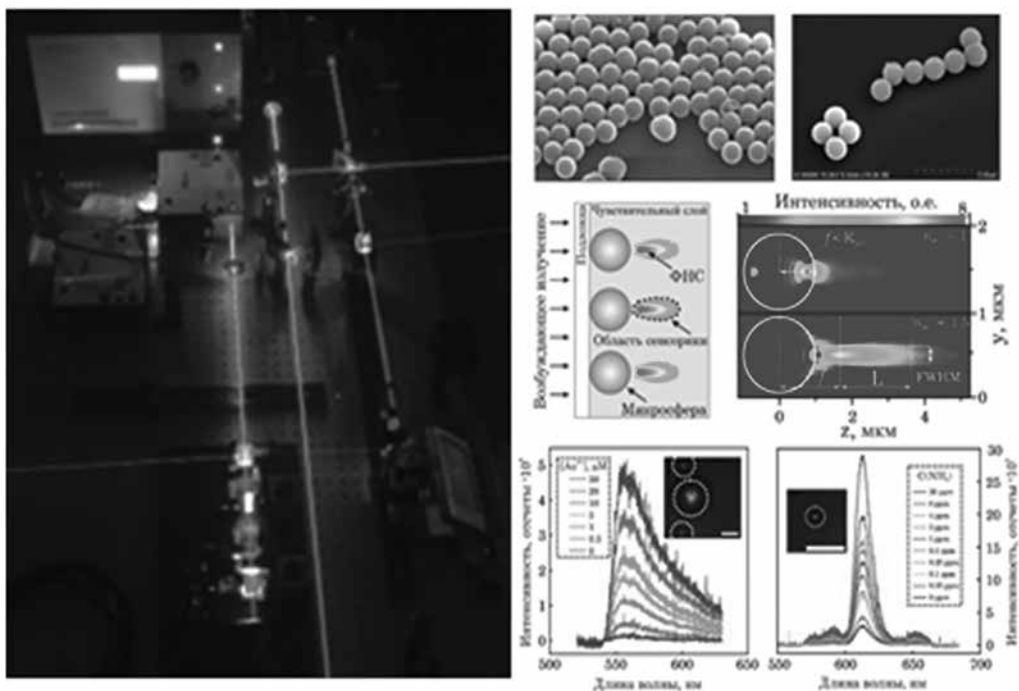


Фото 14. Слева – оптическая система управления лазерным излучением на основе квантовых точек сульфида кадмия [47]; справа – локализация оптического излучения в чувствительный слой химического сенсора, основанная на эффекте «фотонной наноструи», генерируемой сферическими частицами оксида алюминия [61]

излучения в среде имеет значительный потенциал при создании фотокаталитических и фотовольтаических систем. Кроме того, преодоление дифракционного предела дает развитие новым методам сверхразрешающей оптической микроскопии. В этой связи проводимые нами исследования формируют теоретический и практический задел для создания новых функциональных устройств фотоники.

Исследования нелинейных оптических процессов дали много приложений для лазерной техники, спектроскопии, оптоволоконных линий связи, фотоники, а также нашли широкое применение в таких отраслях, как экология и медицина. В большинстве веществ оптическая нелинейность наблюдается лишь при очень высоких интенсивностях света, способных привести к разрушению вещества. Столь высокая интенсивность света, необходимая для возникновения оптической нелинейности, является очень существенным препятствием для более широкого использования данного явления. Как правило, в нелинейной оптике определяющую роль играют процессы, протекающие на атомном и молекулярном уровнях. Развитие в научной школе исследований в области нанофотоники и нанотехнологий позволило создать новые гетерогенные наноструктурированные диэлектрические материалы, состоящие из диэлектрической матрицы, в которую внедрены диэлектрические частицы нанометровых размеров. Нами было показано, что подобные гетерогенные структуры при выполнении определенных условий, касающихся таких параметров, как размер, форма, диэлектрическая проницаемость матрицы и наночастиц, начинают демонстрировать оптическую нелинейность уже при малых интенсивностях света. При этом величина нелинейного отклика имеет совершенно нетипичную для поведения оптической нелинейности зависимость от интенсивности света. Первые в мире систематические экспериментальные и теоретические исследования такой уникальной низкопороговой оптической нелинейности и построение ее теории были начаты в ИАПУ ДВО РАН в 2007 г. [43]. Было выяснено, что определяющую роль в механизме низкопороговой оптической

нелинейности играет взаимодействие фотонов света с диэлектрическими наночастицами, а не с атомами или молекулами вещества, как при обычной нелинейности [29, 43].

Было показано, что взаимодействие с диэлектрическими наночастицами единичных фотонов света рождает в них экситоны, что приводит к поляризации наночастиц и возникновению у них гигантского дипольного электрического момента, который на два и более порядков величины больше, чем у атомов или молекул. При этом вид рождаемых в наночастицах экситонов, их энергетический спектр и кинетика играют основную роль в формировании оптических свойств гетерогенных диэлектрических наноструктур [46]. Это открывает возможности проявления в наночастицах экситонных состояний топологического характера. Как было установлено в результате наших исследований, в наночастицах возможно рождение разных видов экситонов: прямых локализованных и горячих 3D экситонов, а также прямых и пространственно не прямых 2D экситонов, локализованных вблизи границы раздела сред наночастица–матрица (фото 15) [30, 31]. Именно это приводит к пересечению задач нелинейной оптики диэлектрических наноструктур с топологическими фотоникой и экситоникой, что сегодня является предметом наших интенсивных исследований.

Если энергию лазерного импульса фемто- или наносекундной длительности локализовать на масштабах в несколько сотен нанометров, получим световые поля со сверхвысокой напряженностью электрического поля. Такое экстремальное локальное лазерное воздействие способно инициировать в облученном материале сложную цепочку электродинамических, термических, акустических и гидродинамических процессов, что в конечном итоге приведет к формированию на поверхности объекта уникальных функциональных наноструктур, которые достаточно сложно воспроизвести с использованием других методов нанотехнологии. Особый практический интерес представляют наноструктуры из

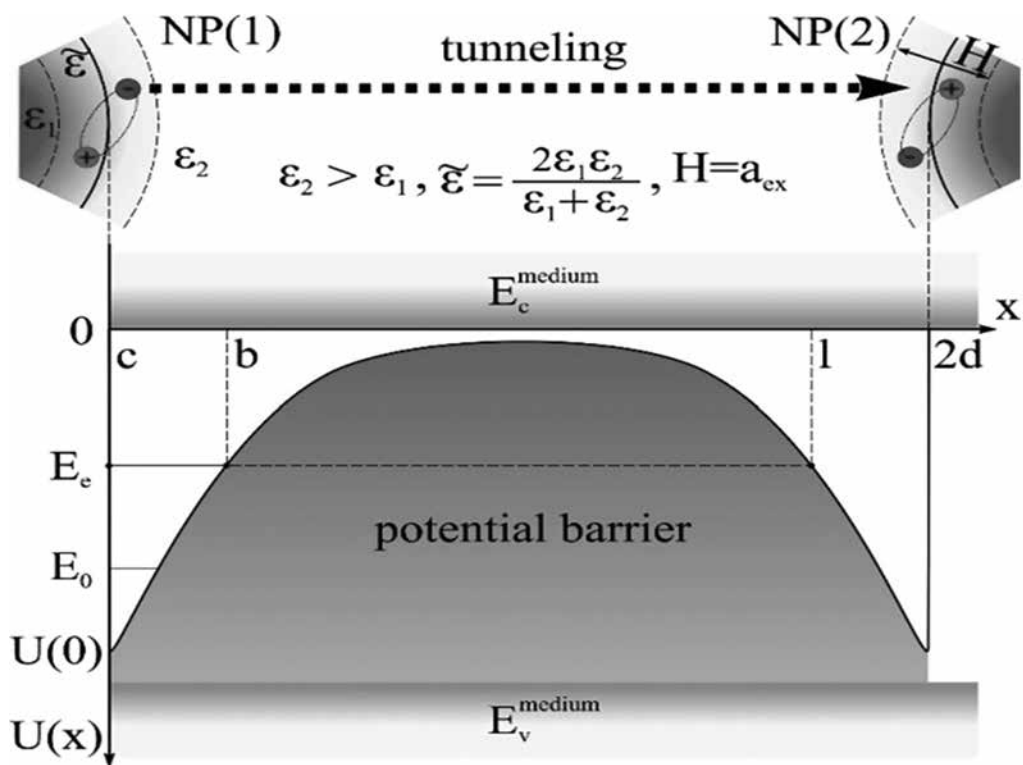


Фото 15. Пример комплекса из 2D не прямых экситонов в структуре двух наночастиц NP(1) и NP(2) и потенциального барьера для электронов на границе наночастица–окружающая среда [30, 31]



Фото 16. Сотрудники лаборатории прецизионных оптических методов измерений. На левом фото слева направо – аспирант С. Сюбаев, к.ф.-м.н. А. Жижченко и к.ф.-м.н. С. Гурбатов; на правом фото – к.ф.-м.н. А. Кучмижак

благородных металлов, которые могут поддерживать индуцированные внешним электромагнитным полем резонансные колебания электронной плотности, называемые поверхностными плазмонами. Плазмонные эффекты активно используются в различных областях, например при разработке сверхчувствительных сенсорных устройств, фильтров и фотодетекторов, в нелинейной оптике, биомедицине и т.д. Возможность изготовления и тиражирования плазмон-активных наноструктур с использованием простой одноэтапной и дешевой технологии, использующей импульсное лазерное излучение, открывает перспективы для коммерциализации соответствующих устройств.

Коллективом молодых ученых лаборатории прецизионных оптических методов измерений (фото 16) изучены фундаментальные физические механизмы взаимодействия остросфокусированных фемтосекундных лазерных импульсов с тонкими и толстыми пленками благородных металлов. Показано, что такое взаимодействие посредством процессов локального плавления и акустической релаксации расплавленного слоя приводит к формированию уникальных поверхностных наноструктур – полых нановыпуклостей, наностриий и шипастых нанотекстур [40, 42, 44, 68]. Разработанная на основе изученных принципов лазерная технология была использована для реализации сверхплотной записи оптической информации, создания плазмонных сенсорных устройств для детектирования изменения показателя преломления жидкостей и тонких слоев. Эта технология применена также в оптических сенсорах, работающих на принципах поверхностно-усиленной люминесценции и поверхностно-усиленного комбинационного рассеяния, в устройствах нелинейной плазмоники, а также для управления светоизлучающими свойствами квантовых точек в ИК-области спектра. Работы по данному направлению вошли в цикл из более чем 20 статей, опубликованных в высокорейтинговых научных изданиях [23, 45, 60, 69].

Импульсное лазерное излучение открывает перспективы для обработки и изготовления функциональных устройств из новых перспективных материалов, несовместимых со стандартными методами электронной или ионно-лучевой литографии. К таким материалам относятся галогенидные перовскиты, представляющие собой прямозонные полупроводниковые минералы, в которых удачно сочетаются исключительные светоизлучающие свойства и возможность дешевого и масштабированного изготовления пленок и микрокристаллов из него с использованием методов классической химии. Поскольку воздействие электронных и ионных пучков приводит к быстрой деградации светоизлучающих характеристик перовскитных материалов, а обработка перовскитов несовместима с жидкофазным химическим травлением, нами в сотрудничестве с Университетом ИТМО (Институт точной механики и оптики, г. Санкт-Петербург) был разработан неdestructивный высокопроизводительный метод фемтосекундной проекционной лазерной печати фотонных микроэлементов в пленках свинцово-галогенидных перовскитов. Предложенный метод позволяет изготавливать из перовскитов высококачественные микродисковые и микрополосковые лазеры с минимальным размером элементов (до 500 нм) и низким порогом

лазерной генерации, дифракционные микрорешетки с минимальным периодом до 300 нм, элементы фокусирующей микрооптики. Метод может также найти применение в таких областях, как оптическая запись и хранение информации, квантовые коммуникации, солнечная электроэнергетика и т.д. [70, 71].

Сегодня в ИАПУ ДВО РАН проводятся комплексные исследования по разработке нового научного направления, связанного с созданием сверхчувствительной миниатюрной диагностической сенсорной системы lab-on-chip.

Оптическая рефрактометрия на основе поверхностного плазмонного резонанса является на сегодняшний день магистральным направлением в био- и хемосенсорике благодаря высокой чувствительности, простоте изготовления и универсальности плазмон-поляритонных сенсоров. В рамках данного направления коллектив исследователей под руководством д.ф.-м.н., профессора О.Б. Витрика (фото 17) предложил и исследовал принципиально новый подход к построению волоконно-оптических рефрактометрических сенсоров. Как правило, известные схемы возбуждения плазмон-поляритонных колебаний с использованием волоконных световодов требуют нарушения целостности световода посредством удаления части его оптической оболочки химическим или механическим способом, либо же для возбуждения колебаний необходимы были дополнительные волноводные элементы, например наклонные или длиннопериодные дифракционные решетки. В отличие от этих известных способов, в нашем случае используются обычные немодифицированные одномодовые волоконные световоды с нанесенной непосредственно на их оптическую оболочку металлической пленкой, плазмонный резонанс в которых возбуждается через оболочечную моду шепчущей галереи посредством изгибной деформации световода. В этом случае возбуждение плазмонного резонанса существенным образом модифицирует спектр пропускания волоконного световода, что обеспечивает возможность проведения высокоточных рефрактометрических измерений как в спектральном, так и в амплитудном режимах регистрации сигнала. Данный подход был использован нами при разработке высокочувствительных фотонных сенсоров [8, 26].



Фото 17. У экспериментального стенда для исследования поверхностного плазмонного резонанса д.ф.-м.н., профессор О.Б. Витрик (слева) и к.ф.-м.н., старший научный сотрудник А.В. Дышлок



Во многих случаях применение в составе оптических сенсоров металлов неизбежно сопряжено с омическими потерями, что приводит к значительному уширению резонансных спектральных линий и соответственно к снижению точности рефрактометрических измерений. Для устранения этой проблемы в процессе измерения нами предложено использовать резонансы Фано и связанные с ними эффекты, подобные электромагнитно-индуцированной прозрачности и расщеплению Аутлера–Таунса (Раби), которые позволяют обеспечивать резкие перепады от максимального до практически нулевого значения в спектрах отражения, пропускания и рассеяния. Это открыло новые возможности в управлении формой спектрального отклика резонансных систем и создании высокоэффективных функциональных элементов фотоники, в особенности коммутационных и сенсорных устройств. В процессе исследований нами впервые были обнаружены и исследованы резонансы Фано, возникающие в изогнутом волноводном резонаторе Фабри–Перо. Указанные явления открывают недоступные ранее возможности в области построения полностью диэлектрических волоконно-оптических рефрактометров и могут привести к радикальному улучшению их метрологических характеристик [7, 27, 28].

Использование в качестве конструкционных элементов датчиков физических величин волоконно-оптических световодов, которые позволяют сочетать в одном и том же тракте две важные функции – защищенных от влияния окружающей среды линий передачи оптического излучения и чувствительных элементов сенсоров, уже на протяжении многих лет является предметом нашего изучения. В результате был разработан и исследован новый тип оптических интерферометров – одноволоконные многомодовые интерферометры, которые послужили основой для создания сосредоточенных и распределенных датчиков механических деформаций и напряжений, акселерометров, датчиков температуры и т.д. Дальнейшие наши исследования были направлены на разработку принципов создания амплитудных, фазовых и спектральных датчиков физических величин, а также их топологии и адаптивных и нейросетевых методов обработки сигналов волоконно-оптических измерительных сетей как основы SmartGrid-систем мониторинга технических конструкций, технологических процессов и природных явлений. Проблема создания систем сейсмоакустического мониторинга состояния природных и техногенных объектов является весьма актуальной для решения задач геофизики, безопасности жизнедеятельности, рационального природопользования и т.д. При этом все большее внимание уделяется регистрации низкочастотных сейсмосигналов, которые способны распространяться на значительные расстояния, а сейсмоускорение поверхности Земли считается наиболее информативным параметром [34], так как оно прямо пропорционально силе источника сейсмического события. Для регистрации сейсмоускорения, как правило, используются инерциальные акселерометры, в которых амплитуда колебаний инертной массы на низких частотах прямо пропорциональна амплитуде сейсмоускорения. Требования к пороговой чувствительности инерциальных акселерометров весьма высоки. Поэтому при создании акселерометров, предназначенных для регистрации слабых низкочастотных сейсмосигналов, необходимо обеспечить их пороговую чувствительность не хуже  $10^{-7}$  м/с<sup>2</sup>, что соответствует смещениям инерциальной массы на величину порядка  $10^{-12}$  м [1]. В случае, когда речь идет о создании мобильных сейсмоакустических измерительных устройств, только применение волоконно-оптических интерферометров позволяет обеспечить указанную чувствительность [36].

На фото 18 показан разработанный в ИАПУ ДВО РАН волоконно-оптический акселерометр на основе интерферометра Маха–Цендера, в котором используется метод активного гомодинирования. Коэффициент преобразования такого акселерометра в области низких частот составляет 600 В/(м/с<sup>2</sup>), что при уровне собственных шумов измерительной схемы 60 мкВ обеспечивает его пороговую чувствительность  $\sim 10^{-7}$  м/с<sup>2</sup> на частоте 20 Гц [16].

Пассивное гомодинирование в схеме волоконно-оптического интерферометра Маха–Цендера было использовано для создания деформометра, предназначенного для

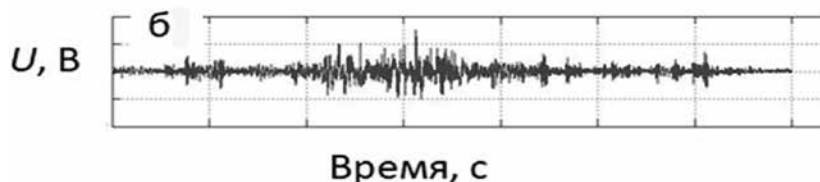


Фото 18. Установка волоконно-оптического акселерометра (а) и сейсмограмма сигнала, созданного движущимся на расстоянии 500 м автотранспортным средством (б)

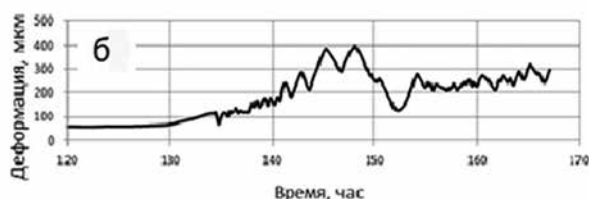


Фото 19. Волоконно-оптический деформометр, используемый для контроля сейсмической обстановки на руднике «Николаевский» (а), и график временной зависимости сигнала деформации стенки горной выработки, зарегистрированной волоконно-оптическим деформометром на руднике «Николаевский» (б)

регистрации деформационных процессов в шахтах и рудниках для прогнозирования горных ударов [37]. Как и для волоконно-оптического акселерометра, чувствительным элементом такого деформометра является волоконный световод измерительного плеча интерферометра, который посредством упругого троса жестко связан с поверхностью Земли или контролируемого объекта и удлинение которого вызывает изменение выходного сигнала измерительного устройства. Благодаря такой организации чувствительной системы деформометра обеспечивается высокая точность регистрации изменения расстояния между двумя удаленными точками пространства.

В настоящее время разработанные в ИАПУ ДВО РАН конструкции волоконно-оптических акселерометров и деформометров успешно используются для проведения мониторинга

вулканической деятельности, наблюдения за сейсмологической обстановкой при проведении горных работ (фото 19) и для контроля морских акваторий [10, 13, 38].

Оптическая интерферометрия – один из наиболее чувствительных методов, позволяющих регистрировать сверхмалые физические величины (деформации, перемещения, вибрацию и пр.). Теоретическая оценка чувствительности классического интерферометра свидетельствует о его потенциальной возможности обеспечить измерение механических вибраций амплитудой менее  $0,01 \text{ \AA}$  в полосе частот до 100 кГц. Однако на практике для достижения столь высокой чувствительности необходимо решить две основные проблемы, а именно: добиться полного сопряжения волновых фронтов интерферирующих волн и обеспечить и постоянно поддерживать квадратурные условия детектирования сигнала. Комплексное решение обеих этих проблем достигается за счет объединения интерферирующих световых пучков на динамической голограмме, формируемой ими же в фоторефрактивном кристалле [12, 39]. Благодаря конечности времени записи голограммы ( $10^{-4}$ – $10^2$  с) интерферометрическая система, в которой одно из зеркал заменено на динамическую голограмму, становится адаптивной, т.е. способной подстраиваться под неконтролируемые изменения внешних условий и факторов, и сохраняет при этом работоспособность и высокую чувствительность.

С целью реализации такой возможности нами был предложен и исследован новый тип многоволнового взаимодействия световых волн в фоторефрактивном кристалле – ортогональное векторное трехволновое взаимодействие, применение которого позволило создать полностью поляризационно-независимый адаптивный голографический интерферометр [24, 25, 55]. Также были разработаны принципы сверхплотного мультиплексирования динамических голограмм, что открыло перспективы для создания многоканальных (с числом каналов более 1000) измерительных систем на основе адаптивных интерферометров [57].

В результате создан ряд уникальных высокостабильных измерительных устройств и комплексов. В их числе сверхчувствительные лазерные «весы», которые позволяют измерять массу микро- и нанообъектов с точностью  $6 \times 10^{-17}$  г [52, 56], а также адаптивный лазерный «дальномер», обеспечивающий регистрацию малых перемещений объектов в диапазоне от 0,3 до 1100  $\text{\AA}$  [49]. На основе адаптивного интерферометра были разработаны лазерный микрофон [50] и семейство лазерных гидрофонов, способных в условиях реальной морской акватории в присутствии значительных портовых шумов и при неблагоприятных погодных условиях устойчиво регистрировать слабые гидроакустические сигналы [18, 51, 54]. Одно из последних наших достижений – создание векторно-фазового адаптивного лазерного гидрофона, обладающего способностью не только регистрировать наличие в акватории источника слабых гидроакустических сигналов, но и определять на него направление (фото 20) [53]. Нами разработаны также распределенные адаптивные волоконно-оптические

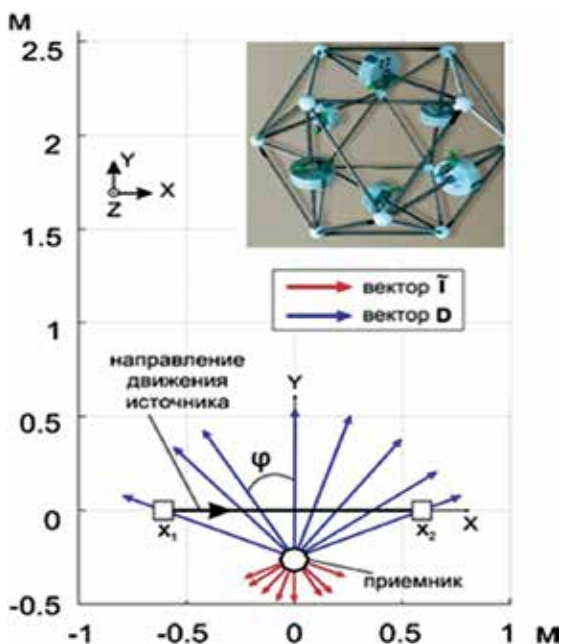


Фото 20. Векторно-фазовый адаптивный лазерный гидрофон (вставка) и пример определения направления (вектор  $D$ ) на движущийся подводный источник гидроакустического сигнала

системы неразрушающего контроля и технического мониторинга, применение которых позволяет осуществлять техническую диагностику летательных аппаратов, автомобилей, морских судов непосредственно в процессе их эксплуатации [3, 48].

В 2015 г. в ИАПУ ДВО РАН был создан Центр лазерных технологий. Центр такого уровня является единственным в ДФО (фото 21). Главная его задача заключается в обеспечении научных исследований, оказании услуг промышленным предприятиям, заинтересованным во внедрении в производство лазерных технологий, а также трансфер лазерных технологий в промышленность и реальный сектор экономики. Сегодня в Центре лазерных технологий на основе фундаментальных и прикладных исследований процессов взаимодействия мощного лазерного излучения со средами разработан ряд новых технологических процессов лазерной обработки материалов, в том числе сплавов на основе титана, магния, алюминия, меди, свинца, а также коррозионно-стойкой высокопрочной стали [21]. Эти технологии включают в себя: лазерную сварку; лазерную порошковую наплавку/плакирование; лазерную проволочную наплавку; лазерную резку; лазерную гравировку и маркировку изделий промышленного производства; лазерную селективную очистку поверхности объектов, включая удаление масел и красок; лазерную селективную подводную очистку корпусов судов и гидротехнических сооружений от биообрастателей [15, 18]. Коллектив Центра лазерных технологий ИАПУ ДВО РАН принимает активное участие в разработке фундаментальных основ управления аддитивными процессами формирования наноструктурных материалов в поле интенсивного лазерного излучения, в том числе на основе методов искусственного интеллекта [33].

Сегодня Центр лазерных технологий успешно сотрудничает с предприятиями судостроительного и судоремонтного комплексов, а также авиастроительной и авиаремонтной отрасли в ДФО. Наиболее тесное сотрудничество выстроено с ОАО «322 АРЗ», которое является ведущим авиаремонтным предприятием в Дальневосточном регионе и специализируется на сервисном обслуживании, ремонте и утилизации авиационной техники – Су-24, Су-25, Су-27, МиГ-31, Ан-2, Як-52, Ка-27, Ка-29, Ка-32, Ми-8 и их комплектующих (фото 22). Результатом интеграции научной организации и авиаремонтного завода стало создание совместной отраслевой лаборатории, осуществляющей технологическую подготовку авиаремонтного производства к внедрению лазерных технологических операций.



Фото 21. Карта размещения инжиниринговых центров лазерных технологий по территории Российской Федерации



Фото 22. Обложка журнала Объединенной авиастроительной корпорации, в котором после успешного восстановления в Центре лазерных технологий ИАПУ ДВО РАН деталей самолета СУ-25 опубликована похвальная статья о нашей работе

Сотрудники центра являются регулярными участниками Восточного экономического форума, выставок, организуемых Министерством обороны РФ, ОСК и ОАК России. Разработанные в центре технологии востребованы на многих предприятиях региона и Российской Федерации, а его площадка служит также для подготовки и переподготовки специалистов.

В природе живая материя миллионы лет использует энергию солнечного излучения для обеспечения жизнедеятельности биологических объектов. Свет является одним из важных факторов, необходимых для фотосинтеза и развития растения. Соответственно, используя управляемые искусственные световые сигналы, можно контролировать процессы роста, развития и метаболизма растений. Для изучения этой проблемы нами был сконструирован специальный многоэлементный матричный светодиодный источник света, спектр излучения которого может варьироваться в диапазоне длин волн 440–660 нм и даже может быть близким по спектральному составу к спектру излучения Солнца [17]. Процесс управления такими источниками излучения был автоматизирован, что позволило дистанционно управлять интенсивностью и спектральным составом светового потока, а также задавать временной режим освещения растений. На фото 23 показаны световые климатические боксы, которые подготовлены для проведения экспериментов с растениями, при этом в каждом из них задан свой сценарий освещения для выращивания растений.

Нами была поставлена задача по изучению процессов регуляции фотосинтетического аппарата и морфогенеза растений посредством управления интенсивностью, спектром и периодом светового освещения. Результаты таких исследований могут стать фундаментальной основой для создания новых технологий повышения адаптивности,



Фото 23. Световые климатические боксы (а, б), подготовленные для экспериментов по выращиванию растений с заданными сценариями освещения, и монитор автоматизированной системы управления освещением (в)

продуктивности и ценности культурных растений при культивировании их в защищенном грунте. Исследования закономерностей совокупного влияния света, генетических и биохимических факторов на продукционный процесс развития растений проводятся совместно с учеными ФНЦ Биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН.

Выполненные исследования показали, что управляемые матричные светодиодные источники света можно использовать для выращивания растений при полном отсутствии натурального солнечного света. При этом один режим освещения обеспечивает определенное качество света на стадии вегетации, другой – на стадии цветения, а третий – на стадии созревания. Один из примеров, иллюстрирующих результат выращивания растений под таким освещением, приведен на фото 24. В ходе этих экспериментов показано, что использование светильников с динамически управляемыми параметрами излучения в 1,5–2 раза ускоряет процесс развития и созревания растений.



Фото 24. Томаты и салат, выращенные под искусственным освещением управляемых матричных светодиодных источников света

Сегодня наряду с фундаментальными исследованиями влияния светового излучения на генетический аппарат растений мы ставим перед собой задачу изучения процессов первичного и вторичного метаболизма в растениях как их ответных реакций на световое воздействие [41]. Основываясь на полученных знаниях, необходимо разработать технологические основы создания средств комплексного управления развитием растений, обеспечивающих повышение урожайности сельскохозяйственных культур, выращиваемых в защищенном грунте, через наиболее полное раскрытие их генетического потенциала.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология: теория и методы. Т. 1: пер. с англ. М.: Мир, 1983. 360 с.
2. Бабий М.Ю., Голик С.С., Ильин А.А., Кабанов А.М., Колесников А.В., Кульчин Ю.Н., Лисица В.В., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Шмирко К.А. Лидарное зондирование атмосферы с использованием гигаваттных лазерных импульсов фемтосекундной длительности // Квантовая электроника. 2014. Т. 44, № 6. С. 563–569.
3. Башков О.В., Ромашко Р.В., Зайков В.И., Панин С.В., Безрук М.Н., Кхун Х.Х.А., Башков И.О. Детектирование сигналов акустической эмиссии волоконно-оптическими интерференционными преобразователями // Дефектоскопия. 2017. № 6. С. 18–25.
4. Букин О.А., Павлов А.Н., Салюк П.А., Кульчин Ю.Н., Шмирко К.А., Столярчук С.Ю., Бубновский А.Ю. Особенности высотного распределения аэрозоля во время прохождения пылевых бурь над заливом Петра Великого в 2006 г. и их воздействие на фитопланктонные сообщества Японского моря // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20, № 4. С. 341–349.
5. Быковский Ю.А., Кульчин Ю.Н., Розовский М.О., Смирнов В.Л., Старос Ф.Г. Исследование потерь световой мощности в тонкопленочном волноводе из кремния // Изв. вузов. Серия: Радиофизика. 1980. Т. 23. С. 52–55.
6. Голик С.С., Букин О.А., Ильин А.А. и др. Определение пределов обнаружения элементов в воде методом фемтосекундной лазерно-искровой спектроскопии // Журн. прикл. спектроскопии. 2012. Т. 79, № 3. С. 488–492.
7. Дышлюк А.В. Демонстрация резонансных эффектов типа расщепления Ауслера–Таунса, электромагнитно-индуцированной прозрачности и резонансов Фано в деформированном волноводном резонаторе // Компьютерная оптика. 2019. Т. 43, № 1. С. 35–41.
8. Дышлюк А.В., Витрик О.Б., Кульчин Ю.Н. Численное исследование плазмонного резонанса в изогнутом одномодовом металлизированном волоконном световоде в трехмерной геометрии // Компьютерная оптика. 2017. Т. 41, № 5. С. 599–608.
9. Зуев В.В., Балин Ю.С., Букин О.А., Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Кабашников В.П., Невзоров А.В., Осипенко Ф.П., Павлов А.Н., Пеннер И.Э., Самойлова С.В., Столярчук С.Ю., Чайковский А.П., Шмирко К.А. Результаты совместных лидарных наблюдений аэрозольных возмущений стратосферы на станциях сети Cis-Linet в 2008 г. // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22, № 5. С. 450–456.
10. Каменев О.Т., Петров Ю.С., Подлесных А.А., Колчинский В.А., Завестовская И.Н., Кульчин Ю.Н., Ромашко Р.В. Регистрация гидроакустических сигналов с использованием волоконно-оптического акселерометра // Краткие сообщ. по физике ФИАН. 2020. Т. 47 (5). С. 30–35.
11. Константинов О.Г., Павлов А.Н. Комплексный контроль состояния морских акваторий оптическими методами. Ч. 3. Регистрация динамических процессов по снимкам на морской поверхности // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26, № 1. С. 32–39.
12. Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Камшилин А.А., Ромашко Р.В. Адаптивные методы обработки спекл-модулированных оптических полей. М., 2009. 223 с.
13. Кульчин Ю.Н., Каменев О.Т., Петров Ю.С., Колчинский В.А., Подлесных А.А. Волоконно-оптический интерферометрический акселерометр для мониторинга природных и техногенных объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 3. С. 291–296.
14. Кульчин Ю.Н., Букин О.А., Константинов О.Г., Вознесенский С.С., Павлов А.Н., Гамаюнов Е.Л., Майор А.Ю., Столярчук С.Ю., Коротенко А.А., Попик А.Ю. Комплексный контроль состояния морских акваторий оптическими методами. Ч. 1. Концепция построения многоуровневых измерительных систем для экологического мониторинга прибрежных акваторий // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25, № 7. С. 633–637.
15. Кульчин Ю.Н., Никитин А.И., Субботин Е.П. Лазерная подводная очистка корпусов морских судов // Прикладная фотоника. 2020. № 4. С. 90–104.
16. Кульчин Ю.Н., Каменев О.Т., Петров Ю.С., Ромашко Р.В., Колчинский В.А. Разработка физических основ низкочастотной акустической томографии на арктическом шельфе волоконно-оптическими сейсмоприемниками // Изв. РАН. Серия физическая. 2018. Т. 82, № 5. С. 556–559.
17. Кульчин Ю.Н., Субботин Е.П. Управляемые светодиодные матрицы для космических оранжерей // Вед. «Рус. оптического о-ва». 2018. № 3. С. 72–76.
18. Кульчин Ю.Н., Вознесенский С.С., Гамаюнов Е.Л., Голик С.С., Ильин А.А., Каменев О.Т., Никитин А.И., Павлов А.Н., Попик А.Ю., Ромашко Р.В., Субботин Е.П. Фотонные методы и технологии мониторинга океана и атмосферы // Квантовая электроника. 2020. Т. 50, № 5. С. 475–488.
19. Кульчин Ю.Н., Розовский М.О., Старос Ф.Г. Функциональные возможности оптических волноводных элементов в объеме полупроводника // Физико-технологические аспекты создания микроэлектронных структур. Владивосток, 1978. С. 87–105.
20. Лазерный флуориметр: пат. 108844 РФ, МПК G01N21/64 / А.Ю. Майор, О.А. Букин, А.Н. Павлов; патентообладатель ИАПУ ДВО РАН. Заявл. 05.04.2011; опубл. 27.09.2011.
21. Никитин А.И., Кульчин Ю.Н., Гнеденков С.В., Иванов М.Н., Ионов А.А., Машталар Д.В., Пивоваров Д.С., Синячихин С.Л., Субботин Е.П., Шпаков А.В., Яцко Д.С. Исследование возможности практического применения волоконных технологических лазеров в задачах ремонтного восстановления деталей авиационной техники // Роль фундаментальных исследований при реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»: материалы IV Всерос. конф., Москва, 28 июня 2018 г. М.: ВИАМ, 2018. С. 247–267.

22. Bukin O., Proshchenko D., Chekhlenok A., Golik S., Bukin I., Mayor A., Yurchik V. Laser spectroscopic sensors for the development of anthropomorphic robot sensitivity // *Sensors*. 2018. Vol. 18, N 6. P. 1680.
23. Cherepakhin A.B., Pavlov D.V., Shishkin I.I., Voroshilov P.M., Juodkazis S., Makarov S.V., Kuchmizhak A.A. Laser-printed hollow nanostructures for nonlinear plasmonics // *Appl. Phys. Lett.* 2020. Vol. 117. P. 041108.
24. Di Girolamo S., Kamshilin A.A., Romashko R.V., Kulchin Y.N., Launay J.C. Fast adaptive interferometer on dynamic reflection hologram in CdTe:V // *Opt. exp.* 2007. Vol. 15, N 2. P. 545–555.
25. Di Girolamo S., Romashko R.V., Kulchin Y.N., Kamshilin A.A. Orthogonal geometry of wave interaction in a photorefractive crystal for linear phase demodulation // *Opt. Comm.* 2010. Vol. 283, N 1. P. 128–131.
26. Dyshlyuk A.V., Vitrik O.B., Kulchin Y.N., Mitsai E., Cherepakhin A.B., Branger C., Brisset H., Iordache T.V., Sarbu A. Numerical and Experimental Investigation of Surface Plasmon Resonance Excitation Using Whispering Gallery Modes in Bent Metal-Clad Single-Mode Optical Fiber // *J. Lightwave Technol.* 2017. Vol. 35, iss. 24. P. 5425–5431.
27. Dyshlyuk A.V., Eryusheva U.A., Vitrik O.B. Tunable Autler-Townes-like resonance splitting in a bent fiber-optic Fabry–Perot resonator: 3D modeling and experimental verification // *J. Lightwave Technol.* 2020. Vol. 38, N 24. P. 6918–6923.
28. Dyshlyuk A.V. Tunable Fano-like resonances in a bent single-mode waveguide-based Fabry–Perot resonator // *Opt. Lett.* 2019. Vol. 44, N 2. C. 231–234.
29. Dzyuba V.P., Krasnok A.E., Kulchin J.N., Dzyuba I.V. A model of nonlinear optical transmittance for insulator nanocomposites // *Semiconductors*. 2011. Vol. 45, N 3. P. 295–301.
30. Dzyuba V., Kulchin Y., Milichko V. Effect of the shape of a nano-object on quantum-size states // *J. Nanoparticle Res.* 2012. Vol. 14, N 11. DOI: 10.1007/s11051-012-1208-7.
31. Dzyuba V.P., Pokutnyi S.I., Kulchin Y.N. Indirect excitons and polarization of dielectric nanoparticles // *J. Phys. Chem.* 2019. Vol. 123, N 42. P. 26031–26035.
32. Golik S.S., Bukin O.A., Ilyin A.A. et al. Determination of iron in water solution by time-resolved femtosecond laser-induced breakdown spectroscopy // *Plasma Sci. Technol.* 2015. Vol. 17, N 11. P. 975.
33. Gribova V.V., Kulchin Yu.N., Nikitin A.I., Timchenko V.A. The concept of support for laser-based additive manufacturing on the basis of artificial intelligence methods // *Artificial Intelligence. RCAI 2020. Lecture Notes in Computer Science*. 2020. Vol. 12412. P. 403–415.
34. Havskov J., Alguacil G. *Instrumentation in Earthquake Seismology*. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2010. 347 p.
35. Ilyin A.A., Golik S.S. Femtosecond laser-induced breakdown spectroscopy of sea water // *Spectrochim. Acta. Pt B: Atomic Spectroscopy*. 2013. Vol. 87. C. 192–197.
36. Kamenev O.T., Kulchin Yu.N., Petrov Yu.S., Khiznyak R.V., Romashko R.V. Fiber-optic seismometer on the basis of mach-zehnder interferometer // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2016. Vol. 244. P. 133–137.
37. Kamenev O.T., Petrov Yu.S., Podlesnykh A.A. Use of  $3 \times 3$  coupler in the fiber optic strainmeter based on mach-zehnder interferometer // *KnE Energy: VII Int. Conf. on Photonics and Information Optics*. 2018. P. 388–392.
38. Kamenev O.T., Kulchin Y.N., Petrov Y.S., Kolchinskiy V.A. Weak seismic waves detection using ice-mounted fiber-optic accelerometers // *Asia-Pacific conf. on Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics*. 2017: Proc. SPIE. 2019. Vol. 11024. P. 110240M. DOI: 10.1117/12.2324241.
39. Kamshilin A.A., Romashko R.V., Kulchin Y.N. Adaptive interferometry with photorefractive crystals // *J. Appl. Phys.* 2009. Vol. 105, N 3. P. 031101.
40. Kuchmizhak A., Pustovalov E., Syubaev S., Vitrik O., Kulchin Y., Porfirev A., Khonina S., Kudryashov S., Danilov P., Ionin A. On-fly femtosecond-laser fabrication of self-organized plasmonic nanostructures for chemo- and biosensing applications // *ACS applied materials and interfaces*. 2016. Vol. 8. P. 24946–24955.
41. Kulchin Y.N., Nakonechnaya O.V., Gafitskaya I.V., Grishchenko O.V. Plant morphogenesis under different light intensity // *Defect and diffusion forum*. 2018. Vol. 386. P. 201–206.
42. Kulchin Yu.N., Vitrik O.B., Kuchmizhak A.A., Nepomnyashchii A.V., Savchuk A.G., Ionin A.A., Kudryashov S.I., Makarov S.V. Through nanohole formation in thin metallic film by single nanosecond laser pulses using optical dielectric apertureless probe // *Opt. Lett.* 2013. Vol. 38, N 9. P. 1452–1454. DOI: 10.1364/OL.38.001452.
43. Milichko V.A., Dzyuba V.P., Kulchin Yu.N. Anomalous optical nonlinearity of dielectric nanodispersions // *Quantum Electronics*. 2013. Vol. 43, N 6. P. 567–573.
44. Pavlov D.V., Gurbatov S.O., Kudryashov S.I., Gurevich E.L., Kuchmizhak A.A. Laser-induced surface relief nanocrowns as a manifestation of nanoscale Rayleigh-Plateau hydrodynamic instability // *Appl. Surface Sci.* 2020. Vol. 511. P. 145463.
45. Pavlov D.V., Zhizhenko A.Yu., Honda M., Yamanaka M., Vitrik O.B., Kulinich S.A., Juodkazis S., Kudryashov S.I., Kuchmizhak A.A. Multi-purpose nanovoid array plasmonic sensor produced by direct laser patterning // *Nanomaterials*. 2019. Vol. 9. P. 1348.
46. Pokutnyi S.I., Kulchin Y.N., Dzyuba V.P., Amosov A.V. Biexciton in nanoheterostructures of dielectric quantum dots // *J. Nanophotonics*. 2016. Vol. 10, N 3. DOI: 10.1117/1.jnp.036008.
47. Postnova I., Shchipunov Y., Voznesenskiy S., Sergeev A., Galkina A., Kulchin Y. Photonic materials prepared through the entrapment of quantum dots into silica // *Colloids and Surfaces A: Physicochem. eng. aspects*. 2018. Vol. 536. P. 3–9.
48. Romashko R.V., Bezruk M.N., Kamshilin A.A., Kulchin Y.N. Adaptive distributed tomographic fiber-optical measurement system for non-destructive testing // *Pac. Sci. Rev. A: Nat. Sci. and Eng.* 2013. Vol. 15, N 1. P. 104–107.



49. Romashko R.V., Kulchin Y.N., Asalkhanova M.A. Adaptive interferometry sensor for detection of nanoscale displacements // *Sensors and Transducers*. 2014. Vol. 183, N 12. P. 306.
50. Romashko R.V., Kulchin Y.N., Nippolainen E. Highly sensitive and noise-protected adaptive optical microphone based on a dynamic photorefractive hologram // *Las. Phys.* 2014. Vol. 24, N 11. P. 115604.
51. Romashko R.V., Kulchin Y.N., Bezruk M.N., Ermolaev S.A. Laser adaptive holographic hydrophone // *Quantum Electronics*. 2016. Vol. 46, N 3. P. 277.
52. Romashko R.V., Efimov T.A., Kulchin Y.N. Laser adaptive holographic system for microweighing of nanoobjects // *Quantum Electronics*. 2014. Vol. 44, N 3. P. 269.
53. Romashko R.V., Kulchin Y.N., Storozhenko D.V., Bezruk M.N., Dzyuba V.P. Laser adaptive vector-phase hydroacoustic measuring system // *Quantum Electronics*. 2021. Vol. 51, N 3. P. 265.
54. Romashko R.V., Bezruk M.N., Ermolaev S.A., Zavestovskaya I.N., Kulchin Y.N. Mobile adaptive holographic laser hydrophone // *Bull. of the Lebedev Physics Institute*. 2017. Vol. 44, N 7. P. 205–209.
55. Romashko R.V., Kulchin Y.N., Kamshilin A.A. Polarization-insensitive adaptive interferometer based on orthogonal three-wave mixing in photorefractive crystal // *Pac. Sci. Rev.* 2011. Vol. 13, N 3. P. 252–254.
56. Romashko R., Efimov T., Kulchin Y. Resonance micro-weighing of sub-picogram mass with the use of adaptive interferometer // *Measurement Sci. Rev.* 2014. Vol. 14, N 3. P. 160–163.
57. Romashko R.V., Bezruk M.N., Kamshilin A.A., Kulchin Y.N. Six-channel adaptive fibre-optic interferometer // *Quantum Electronics*. 2012. Vol. 42, N 6. P. 551.
58. Sakerin S.M., Bobrikov A.A., Bukin O.A., Golobokova L.P., Pol'kin Vas.V., Pol'kin Vik.V., Shmirko K.A., Kabanov D.M., Khodzher T.V., Onischuk N.A., Pavlov A.N., Potemkin V.L., Radionov V.F. On measurements of aerosol-gas composition of the atmosphere during two expeditions in 2013 along the Northern Sea Route // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. Vol. 15 (21). P. 12413–12443. DOI: 10.5194/acp-15-12413-2015.
59. Salyuk P., Bukin O., Alexanin A., Pavlov A., Mayor A. Optical properties of Peter the Great Bay waters compared with satellite ocean colour data // *Int. J. Remote Sensing*. 2010. Vol. 31, N 17/18. P. 4651–4664.
60. Sergeev A.A., Pavlov D.V., Kuchmizhak A.A., Lapine M.V., Yiu W.K., Dong Y., Ke N., Juodkazis S., Zhao N., Kershaw S.V., Rogach A.L. Tailoring spontaneous infrared emission of HgTe quantum dots with laser-printed plasmonic arrays // *Light: Science and Applications*. 2020. Vol. 9. P. 1–10.
61. Sergeeva K.A., Tutov M.V., Voznesenskiy S.S., Shamich N.I., Mironenko A.Yu., Sergeev A.A. Highly-sensitive fluorescent detection of chemical compounds via photonic nanojet excitation // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2020. Vol. 305. P. 127354.
62. Soref R.A., Lorenzo J.P. All-silicon active and passive guided-wave components for  $\lambda = 1.3$  and  $1.6 \mu\text{m}$  // *IEEE J. Quant. Electron.* 1986. Vol. 22. P. 873–879.
63. Voznesenskii S.S., Gamayunov E.L., Popik A.Yu., Korotenko A.A. A fiber-optic fluorometer for measuring phytoplankton photosynthesis // *Instruments and Experimental Techniques*. 2014. Vol. 57, N 3. P. 330–335.
64. Voznesenskiy S.S., Popik A.Y., Gamayunov E.L., Orlova T.Y., Markina Z.V., Kulchin Y.N. Biosensors based on micro-algae for ecological monitoring of the aquatic environment // *Algae – organisms for imminent biotechnology* / eds N. Thajuddin, Dh. Dhanasekaran. 2016. DOI: 10.5772/62801.
65. Voznesenskiy S.S., Sergeev A.A., Galkina A.N., Kulchin Y.N., Postnova I.V., Shchipunov Y.A. Dynamic laser-induced effects in nanocomposite systems based on the cadmium sulfide quantum dots in a silicate matrix // *Optics Express*. 2015. Vol. 23, N 4. P. 4415–4420.
66. Voznesenskiy S.S., Popik A.Yu., Gamayunov E.L., Orlova T.Yu., Markina Zh.V., Postnova I.V., Shchipunov Yu.A. One-stage immobilization of the microalga *Porphyridium purpureum* using a biocompatible silica precursor and study of the fluorescence of its pigments // *Eur. Biophys. J.* 2018. Vol. 47, N 1. P. 1–11.
67. Voznesenskiy S.S., Gamayunov E.L., Popik A.Yu., Markina Zh.V., Orlova T.Yu. Temperature dependence of the parameters of laser-induced fluorescence and species composition of phytoplankton: the theory and the experiments // *Algal Res.* 2019. Vol. 44. P. 101719.
68. Wang X.W., Kuchmizhak A.A., Li X., Juodkazis S., Vitrik O.B., Kulchin Yu.N., Zhakhovsky V.V., Danilov P.A., Ionin A.A., Kudryashov S.I., Rudenko A.A., Inogamov N.A. Laser-induced translative hydrodynamic mass snapshots: noninvasive characterization and predictive modeling via mapping at nanoscale // *Phys. Rev. Appl.* 2017. Vol. 8. P. 044016. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.8.044016.
69. Wang X., Kuchmizhak A., Storozhenko D., Makarov S., Juodkazis S. Single-step laser plasmonic coloration of metal films // *ACS applied materials and interfaces*. 2018. Vol. 10. P. 1422–1427. DOI: 10.1021/acsami.7b16339.
70. Zhizhchenko A.Y., Tonkaev P., Gets D., Larin A., Zuev D., Starikov S., Pustovalov E.V., Zakharenko A.M., Kulnich S.A., Juodkazis S., Kuchmizhak A.A., Makarov S.V. Light emitting nanophotonic designs enabled by ultrafast laser processing of halide perovskites // *Small*. 2020. Vol. 16 (19). P. 2000410.
71. Zhizhchenko A., Syubaev S., Berestennikov A., Yulin A.V., Porfirev A., Pushkarev A., Shishkin I., Golokhvast K., Bogdanov A.A., Zakhidov A.A., Kuchmizhak A.A., Kivshar Yu.S., Makarov S.V. Single-mode lasing from imprinted halide-perovskite microdisks // *ACS nano*. 2019. Vol. 13. P. 4140–4147.