

Лазерные технологии исследования океана

О.А. Букин¹, А.Н. Павлов², П.А. Салюк³, С.С. Голик⁴,
А.А. Ильин³, А.Ю. Бубновский^{2*}

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

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

³Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН
690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

⁴Дальневосточный государственный университет
690050, г. Владивосток, ул. Суханова, 8

Поступила в редакцию 22.07.2010 г.

Дан обзор использования современных лазерных технологий исследования океана. Приведены результаты разработки лазерных методов для исследования гидрофизических процессов, мониторинга фитопланктонных сообществ и определения элементного состава морской воды и клеток фитопланктона. Описан судовой гидролидарный комплекс, позволяющий восстанавливать структуру светорассеивающих слоев и проводить регистрацию внутренних волн. Рассмотрены основные результаты применения лазерной флуориметрии для мониторинга фитопланктонных сообществ, а также для проведения подспутниковых измерений сканеров цвета морской поверхности и разработки региональных алгоритмов восстановления концентрации хлорофилла «А» из спутниковых данных. Приведены основные результаты, полученные при разработке метода лазерной искровой спектроскопии с использованием лазерных импульсов наносекундной и фемтосекундной длительности для определения концентрации элементов, входящих в состав морской воды и клетки фитопланктона.

Ключевые слова: лазер, гидролидар, флуориметр, лазерная индуцированная флуоресценция, лазерная искровая спектроскопия; laser, hydroliadar, fluorimet, laser induced fluorescence, laser breakdown spectroscopy.

К настоящему времени лазеры прочно заняли свою нишу в исследовании океана, большое число задач в различных областях науки об океане решается с использованием лазерной техники. Приступить к решению многих проблем стало возможным только благодаря появлению таких источников света, как лазер. В настоящей статье мы не будем касаться тех приложений, которые связаны с лазерными методами исследования параметров атмосферы над океаном, поскольку даже краткий обзор использования лазеров для исследования атмосферных процессов над океаном выйдет далеко за рамки одной статьи. Да и сам перечень приложений лазерных технологий для исследования океана и освоения его ресурсов довольно велик. Рассмотрим лишь те, которые, на наш взгляд, наиболее перспективны и значительно продвигают понимание процессов, протекающих в океане.

Приведем также результаты своих разработок лазерных методов для регистрации и исследования

гидрофизических процессов, протекающих в верхнем слое океана (ВСО), для оценки состояния клеток фитопланктона и изучения роли фитопланктонных сообществ в климатической системе планеты, в области геохимии и биологических исследований океана. Перечень ссылок на литературные источники не претендует на полноту, в основном приводятся работы авторов и коллективов, которые стояли у истоков цитируемых приложений, или наиболее оригинальные, на наш взгляд, разработки.

1. Лидарные комплексы для исследования гидрофизических процессов в ВСО

Современные лидары широко используются в практике батиметрии и картирования рельефа дна прибрежных районов [1, 2], для измерения гидрооптических [3–5] и гидрологических [6–8] характеристик верхнего слоя океана, оценки биопродуктивности морских вод по содержанию в них хлорофилла «А» и растворенного органического вещества (РОВ) [9–11] при оперативном экологическом контроле морских акваторий и обнаружении неф-

* Олег Алексеевич Букин (o_bukin@poi.dvo.ru); Андрей Николаевич Павлов (anpravlov@poi.dvo.ru); Павел Анатольевич Салюк (pas81@list.ru); Сергей Сергеевич Голик; Алексей Анатольевич Ильин; Антон Юрьевич Бубновский.

тяных пленок на морской поверхности [12, 13], поиске косяков рыб [14, 15].

Принцип действия лидара состоит в излучении в водную толщу короткого светового импульса и приеме рассеянного средой излучения. Поток обратно рассеянного лазерного излучения несет в себе информацию о среде, связанную с процессами упругого молекулярного рассеяния, рассеяния на взвешенных частицах (рассеяние Ми) и неупругого рассеяния, к которому относится флуоресценция РОВ и пигментов фитопланктона, спонтанное комбинационное рассеяние (КР) молекулами воды. Широкий круг параметров водной среды (первичные гидрооптические характеристики, гидрологические и биооптические параметры) определяют характеристики эхосигнала в широком спектральном диапазоне.

Впервые идея использования лазеров для локации подводных объектов и картирования рельефа морского дна была озвучена в середине 60-х гг. XX в. [16, 17], а первые работы по лазерному зондированию верхнего слоя океана с научно-исследовательских судов были проведены в Советском Союзе [18] и Канаде [19] в начале 70-х гг. Возможность проведения зондирования океана непосредственно через границу раздела атмосфера–океан стимулировала развитие лидарной техники и методологии лазерного авиазондирования водных бассейнов и морских акваторий. В очень короткие сроки, начиная с конца 70-х гг., в США [20], Советском Союзе [21, 22], Канаде [23], Австралии [24] и Швеции [25] были разработаны и прошли успешные испытания «летающие лаборатории» с гидролидарами на борту.

Неоспоримое преимущество авиационных лидаров по сравнению с их судовыми аналогами состоит в охвате и обследовании неизмеримо больших территорий за одно и то же время, что при решении таких практических задач, как картирование рельефа дна морских акваторий и поиск косяков рыб, значительно снижает стоимость проведения работ. Флуоресцентные лидары, расположенные на авианосителе, способны за короткий промежуток времени произвести обнаружение и картирование нефтяного пятна, определить динамику его эволюции и дать оценку объема нефтепродуктов в пленке.

Судовые лидары, уступая авиационным в мобильности, имеют свои преимущества. Во-первых, размещение лидара на борту судна дает возможность реализовать различные схемы зондирования путем изменения бистатической базы лидара, что позволяет более корректно восстанавливать гидрооптические характеристики среды с учетом кратности рассеяния [26, 27]. Во-вторых, в схеме судового лидарного зондирования может быть использована оптическая шахта с заглубленным ниже ватерлинии иллюминатором.

Зондирование через открытую морскую поверхность в значительной степени ограничивает возможности лидарного зондирования. Влияние

близка от границы раздела, стохастическое поведение уклонов площадок морской поверхности, фокусирующие свойства морской поверхности — лишь краткий перечень факторов, вносящих неопределенность в геометрию передачи лазерного излучения в среду и регистрации сигнала обратного рассеяния [28, 29]. Использование оптических шахт при проведении лазерного зондирования позволяет уйти от этих проблем и эффективно проводить лидарные измерения по ходу движения судна.

Одна из схем лидарного зондирования верхнего слоя океана была реализована на НИС «Академик Лаврентьев» [30]. Особенность конструкции лидара состояла в том, что зондирование и регистрация сигнала обратного рассеяния производятся через специальную оптическую шахту с заглубленным под морскую поверхность иллюминатором. Такая схема зондирования сводит к минимуму влияние границы раздела воздух–вода на геометрию распространения зондирующего импульса и характеристики регистрируемого сигнала рассеяния от морского гидрозоля.

Пример пространственного распределения коэффициента рассеяния $\alpha(z, x)$ в удаленном от побережья районе приведен на рис. 1.

Лидарные измерения проводились при движении судна со скоростью 8 узлов. Вертикальный профиль $\alpha(z)$ был восстановлен в каждой точке маршрута и нанесен на рис. 1 в цветовой градации. Вдоль всего маршрута наблюдалось практически однородное поле $\alpha(z)$ со слабо выраженной структурой светорассеивающих слоев в области глубин 40 м (глубина расположения пикноклина).

Совершенно иная структура светорассеивающих слоев наблюдается на шельфе при выходе внутренних волн (рис. 2).

Справа приведен температурный профиль, указывающий на присутствие четко выраженного термоклина на характерной для этого сезона глубине 25 м. На вертикальном распределении $\alpha(z, x)$ отчетливо прослеживается присутствие светорассеивающего слоя с максимальной величиной α на глубине залегания термоклина. Светорассеивающие слои главным образом формируются взвешенными частицами, которые в масштабах нескольких часов могут рассматриваться в качестве пассивного трассера, движение которого модулируется гидродинамическими процессами. Волнообразное поведение светорассеивающего слоя на рис. 2 вызвано модуляцией внутренней волной глубины залегания термоклина и взвеси, оседающей на скачке температуры и плотности.

Другой пример регистрации внутренней волны в этом районе приведен на рис. 3. Одновременно с лидарными измерениями вертикального распределения $\alpha(z)$ в дрейфе судна проводились контактные измерения температуры воды системой распределенных по глубине термодатчиков. По вертикальной шкале отложены относительные изменения температуры и $\alpha(z)$, измеренной лидарным методом. По

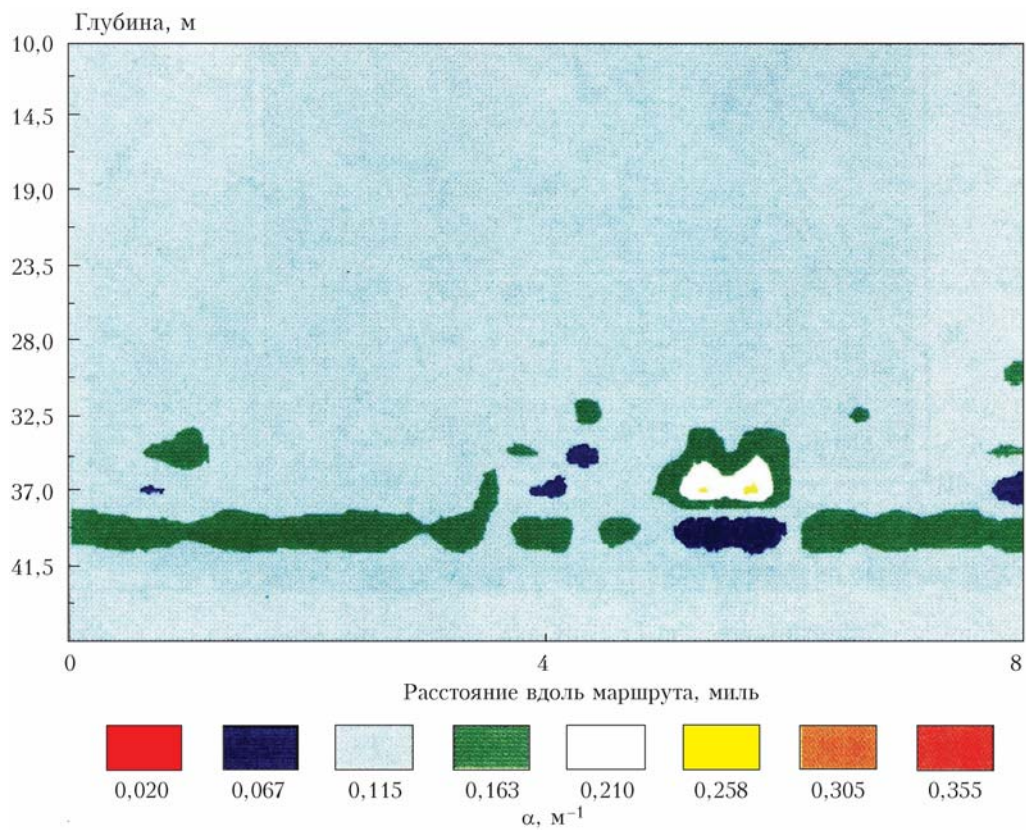


Рис. 1. Структура светорассеивающих слоев вдоль маршрута судна в удаленном районе

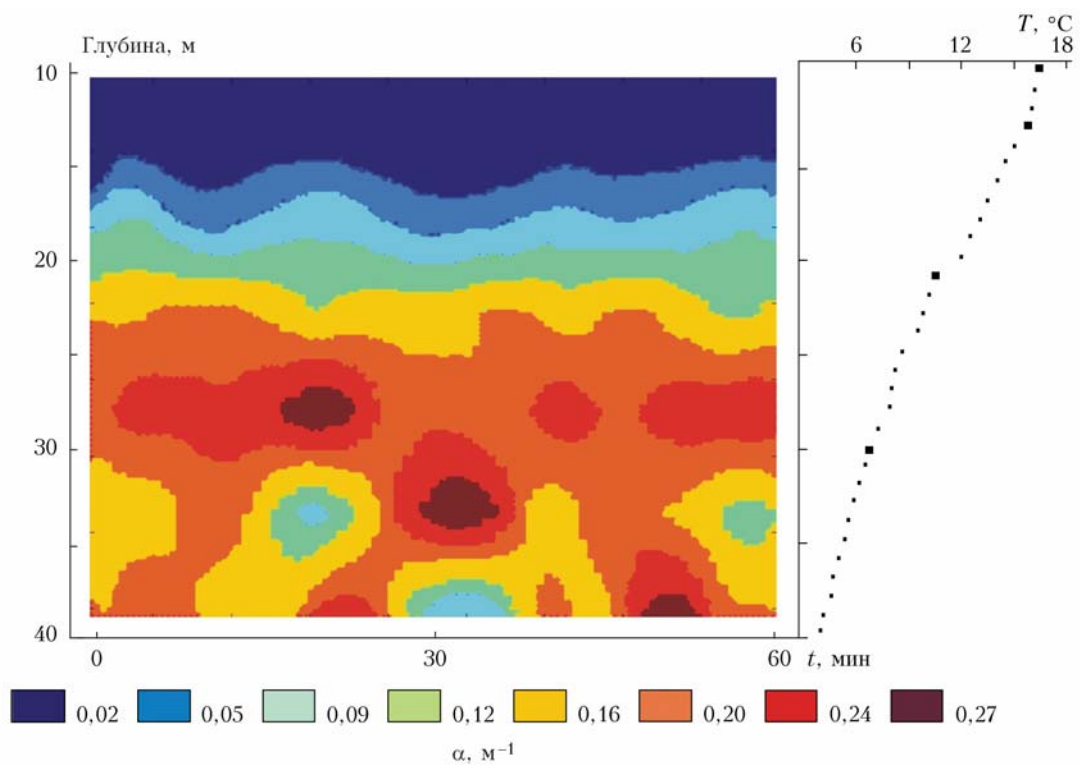


Рис. 2. Структура светорассеивающих слоев вдоль маршрута движения судна, и распределение температуры по глубине (справа) в районе шельфа

горизонтальной оси отложено время проведения эксперимента. В этом случае термоклин располагался в диапазоне 30–50 м. Сравнение временной изменчивости температуры $\Delta T(t, z = 40 \text{ м})$ и $\Delta\alpha(t, z)$ показывает коррелированное поведение этих величин, практически во всем диапазоне глубин, но особенно ярко корреляция между температурным ходом и $\alpha(t)$ проявляется в области 40–50 м.

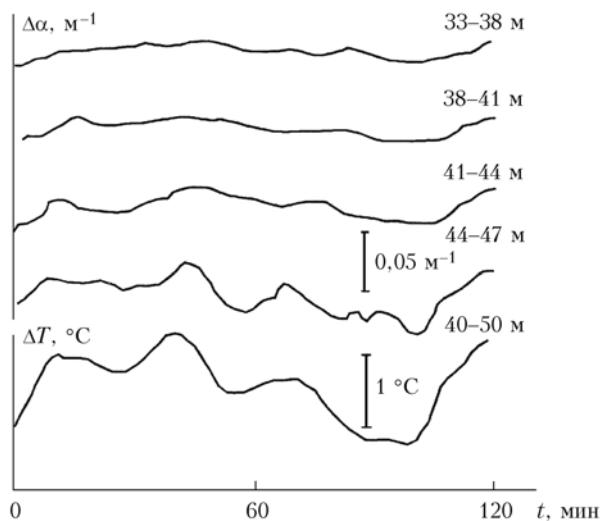


Рис. 3. Одновременная регистрация внутренних волн лидарным и контактным методами

2. Лазерные методы измерения биооптических характеристик морской воды

Лазеры получили широкое распространение в биоокеанологических исследованиях и при оценке качества морских вод. К настоящему времени спектроскопия лазерной индуцированной флуоресценции (ЛИФ) морской воды позволяет оперативно проводить измерения концентрации хлорофилла «А» [9–11, 31], оценивать содержание растворенных органических веществ [32, 33], определять скорости электронного транспорта в реакциях фотосинтеза [11, 34] и исследовать процессы воспроизводства растворенного органического вещества клетками фитопланктона [35].

Можно выделить следующие схемы применения метода ЛИФ: лидары [9–11], погружаемые [34], прокачиваемые [36] и прокачиваемые с погружаемой световодной насадкой [37] флуориметры. Проточные флуориметры по сравнению с лидарными схемами имеют более широкие возможности применения при плохих погодных условиях и более простую реализацию гиперспектральных измерений.

На спектрах флуоресценции морской воды при возбуждении излучением различных длин волн можно выделить следующие основные компоненты:

флуоресценция РОВ и пигментов фитопланктона (хлорофилл «А» — 680 нм, фикоэретрин — 580 нм, фикоцианин — 640 нм), КР воды [9–11]. Комбинационное рассеяние воды используется как внутренний репер [38], и весь спектр переводится в единицы максимальной интенсивности КР. Получаемые измерения могут быть использованы в качестве оценок концентрации регистрируемых компонентов. В случае пигментов интенсивность флуоресценции главным образом зависит от концентрации анализируемого пигмента и от таких дополнительных факторов, как состояние фотосинтезирующего аппарата клеток фитопланктона, видовой состав фитопланктона, освещенность, доступная для фотосинтеза. В случае РОВ не существует стандартных химических методов, измеряющих концентрацию только флуоресцирующих РОВ, поэтому обычно сравнивается интенсивность флуоресценции (ИФ) РОВ и концентрация растворенного органического углерода (РОУ). Это практически всегда линейная зависимость, имеющая разный наклон, обусловленный долей флуоресцирующих РОВ в морской воде [39].

Лазерная флуориметрия может использоваться не только для оценки содержания фитопланктона и растворенных органических веществ, но и для оценки состояния фотосинтезирующего аппарата клеток фитопланктона. Для этого возбуждение флуоресценции производится по схеме «зондирование и накачка» или по схеме «быстроповторяющихся импульсов». Отношение $\phi = (F_m - F_0)/F_m$, где F_0 и F_m — интенсивность флуоресценции хлорофилла «А» при полностью открытых и закрытых реакционных центрах, характеризует то количество энергии, которое может быть использовано для фотосинтеза. Данная величина используется при оценке состояния фитопланктонных сообществ. Она может зависеть от стадии развития водорослей, освещенности, наличия питательных веществ, видового состава водорослей, экологического состояния акватории [40].

Еще одним способом оценки состояния фитопланктонных сообществ является анализ соотношений между ИФ РОВ и ИФ хлорофилла «А» (Q и C) [35]. Преимущество данного метода заключается в простоте инструментальной реализации. Наличие корреляционной связи между Q и C может быть вызвано двумя факторами: 1) РОВ в морской воде воспроизведено фитопланктоном; 2) измерения проводились в районе резкой смены гидрологических параметров морской воды, например, в эстуариях рек или при пересечении течений или вихрей. Во втором случае корреляционная зависимость может быть ложной за счет перехода из вод первого оптического типа во второй или за счет распреснения морской воды речными стоками. Поэтому для исключения влияния гидрологических процессов на соотношения между Q и C рассматриваются только воды с однородными полями тем-

пературы и солености морской воды. Отсутствие значимой корреляции говорит о том, что молекулы РОВ прошли несколько стадий деградации и их содержание уже не связано с функционированием фитопланктонных сообществ на момент измерений либо основная доля РОВ поступила в морскую воду за счет других источников, например за счет стока речных вод или антропогенной активности. В случае наличия линейной зависимости соотношения между Q и C можно описать ортогональной линейной регрессией.

Если рассматривать весь собранный авторами массив данных в различных районах Мирового океана (более 100 000 спектров), то наблюдается общая прямая зависимость между концентрацией хлорофилла «А» и РОВ. Однако при рассмотрении масштабов менее 300 км встречаются случаи обратной зависимости. Это может быть связано с такими процессами, как гибель клеток фитопланктона или «выедание» лабильных молекул РОВ развивающимися фитопланктонными сообществами. Однако при масштабах более 500 км действует общее правило: чем больше клеток фитопланктона, тем больше РОВ в морской воде.

На рис. 4 представлен пример анализа Q – C -диаграмм для трех высокобиопродуктивных вод. Цвет точек на диаграммах соответствует цвету, которым окрашен маршрут судна. На диаграмме 1-го района (рис. 4, *г*, оси в логарифмическом масштабе) выделяются как минимум четыре отдельные области, в каждой из которых наблюдается достаточно высокий коэффициент корреляции. Разделение произошло в соответствии со структурой поверхностных течений, устанавливающейся в рассматриваемое время года. На 2-й диаграмме рассеяния (рис. 4, *д*) можно выделить две области с высокими коэффициентами корреляции. В 3-м районе (рис. 4, *е*), где измерения проводились вне периода цвета водорослей, наблюдалось 8 отдельных областей, причем большая часть из них имела низкие значения корреляции (на диаграмме представлены только четыре кластера, два из которых имеют высокий коэффициент корреляции).

Наклон линейной регрессии между Q и C характеризует удельное воспроизводство РОВ фитопланктонными сообществами. Он может зависеть от всех параметров, влияющих на ИФ хлорофилла «А»: освещенность, состояние, видовой состав и стадия развития фитопланктонного сообщества. Исследования, проведенные нами, показали: наклон линейной регрессии имеет тенденцию к уменьшению по мере возрастания концентрации хлорофилла «А», что согласуется с результатами [41], и к увеличению при росте температуры. В целом этот параметр ведет себя аналогично «биологической активности» P_b , рассчитываемой по данным первичной продукции фитопланктона и описываемой в работе [42] как функция температуры и концентрации хлоро-

филла «А». При использовании Q – C -диаграмм «биологическая активность» может быть оценена оперативнее и на больших акваториях, что перспективно при использовании активного лазерного мониторинга с подвижных носителей.

Многочастотное возбуждение флуоресценции позволяет повысить точность определяемых величин, увеличить количество регистрируемых пигментов фитопланктона, исследовать видовой состав фитопланктона и типы флуоресцирующих РОВ [33, 43, 44]. В работе [45] показано, что при возбуждении зеленым излучением большой вклад во флуоресценцию дает «молодое» РОВ, молекулы которого находятся на начальных стадиях деградации. А при возбуждении ультрафиолетовым излучением флуоресцируют практически все РОВ и относительный вклад флуоресценции «молодого» РОВ в суммарную интенсивность значительно уменьшается.

Еще одной важной по своей значимости задачей, успешно решаемой в рамках метода лазерной флуориметрии, являются верификации спутниковых измерений и настройки региональных алгоритмов восстановления концентрации хлорофилла «А». С этой целью организуются комплексные подспутниковые измерения оптических характеристик морской воды и концентрации хлорофилла «А». При этом анализ Q – C -диаграмм дает дополнительную информацию для оптической классификации вод и разработки более точных региональных биооптических алгоритмов [46]. На рис. 5, *в* приведен пример восстановления концентрации хлорофилла «А» из спутниковых данных по цвету океана по глобальному биооптическому алгоритму (кривая 1) и по региональному алгоритму (кривая 3), разработанному на основе данных лазерной флуориметрии (кривая 2).

Анализируемая акватория в Охотском море была разделена на два района по диаграмме рассеяния «температура–соленость» (T – S) и диаграмме рассеяния между флуоресценцией РОВ и концентрацией хлорофилла «А» (Q – C) (рис. 5, *а* и *б* соответственно). Район I – это распресненные воды с соленостью около 28–29‰ и большим содержанием РОВ, которые связаны со стоком р. Амур в Сахалинский залив. Здесь концентрация хлорофилла «А» мала и органическое вещество определяется в основном процессами его выноса речными водами. Район II – воды с соленостью около 32‰, где значение параметра Q более низкое и органическое вещество определяется преимущественно процессами жизнедеятельности фитопланктона. Концентрация хлорофилла «А» в этих водах существенно выше.

Таким образом, метод ЛИФ позволил оперативно получить данные за 1 сут в двух оптически и гидрологически разных районах и разработать биооптический алгоритм, учитывающий региональные особенности.

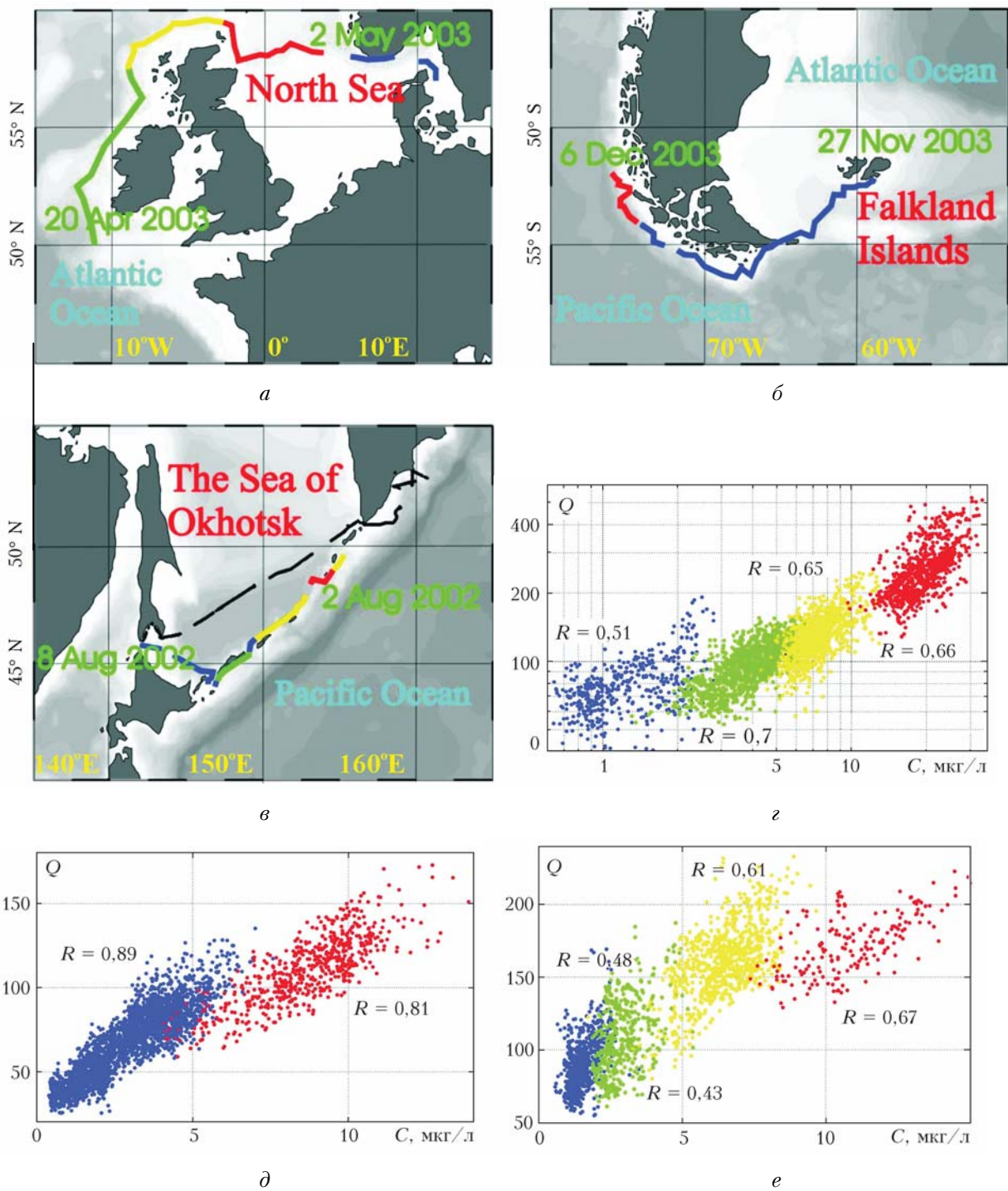


Рис. 4. Анализ *Q*–*C*-диаграмм для трех высокобиопродуктивных районов Мирового океана. *a*, *б*, *в* – маршрут судна, вдоль которого проведены измерения; *г*, *д*, *е* – диаграммы рассеяния «концентрация хлорофилла «А» – ИФ РОВ»

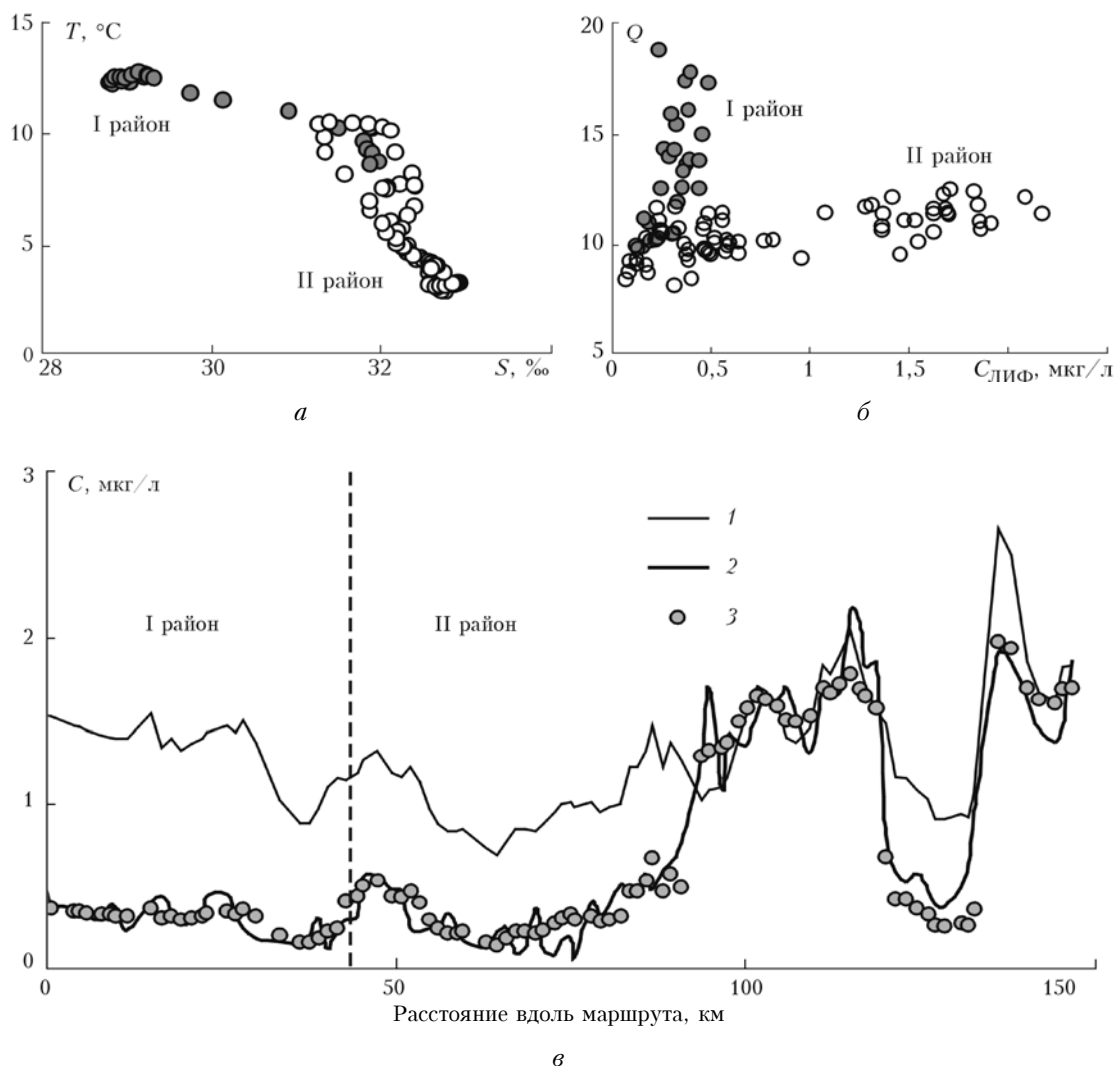


Рис. 5. Разработка региональных биооптических алгоритмов с учетом биооптических и гидрологических особенностей региона: а – диаграмма рассеяния «температура–соленость»; б – диаграмма рассеяния «ИФ РОВ – концентрация хлорофилла «А»»; в – распределение концентрации хлорофилла «А» вдоль маршрута судна (1 – концентрации по данным SeaWiFS; 2 – по спектрам ЛИФ; 3 – скорректированные концентрации по данным SeaWiFS)

3. Лазерная спектроскопия элементного состава морской воды и клеток фитопланктона

Измерение концентрации элементов, входящих в состав морской воды и клетки фитопланктона, необходимо для решения широкого круга фундаментальных и прикладных океанологических задач. Это прежде всего прямые измерения солености и флуктуаций основных компонентов морской воды (Na, Ca, K, Mg), исследование химического состава участков с активной гидротермальной деятельностью на дне океанов и морей, определение содержания общего углерода, содержания остатков продуктов жизнедеятельности и морских организмов (Ca), регистрация элементов загрязнителей морской воды, измерение концентрации биогенных микроэлементов (таких как Fe, P, Mn, Si и др.), которые

значительно влияют на эффективность работы фотосинтезирующего аппарата клеток фитопланктона и рассматриваются в последнее время в связи с проблемами создания условий для искусственного повышения биопродуктивности в бедных планктоном районах Мирового океана и разработки методов использования фитопланктонных сообществ для изменения концентрации CO_2 в атмосфере [47].

Диапазон концентраций вышеуказанных элементов в морской воде или клетках фитопланктона может меняться от десятков грамм на литр до нанogramм на литр. В случае малых концентраций необходимо использовать специальные химические методы анализа, которые, как правило, являются лабораторными и требуют подготовки проб воды или фитопланктона. Однако для корректного решения целого ряда задач необходимо проведение оперативных измерений, практически *in situ* и, как, например, в случае измерения содержания

элементов с малой концентрацией в клетках фитопланктона, долгое хранение проб или их специальная подготовка не желательны. Такие задачи, в которых требуются: определение концентраций целого комплекса различных элементов и соотношения их концентраций, измерение большого числа проб, исключение стадии специальной предварительной подготовки проб, могут быть решены только с использованием метода измерения, который бы и обеспечил необходимые условия.

Использование метода лазерной искровой спектроскопии (ЛИС) для проведения мониторинга элементного состава морской воды и фитопланктона вызывает значительный интерес благодаря возможности определения концентраций химических элементов в режиме *in situ*, отсутствию предварительной подготовки пробы, высокой степени автоматизации и осуществимостью проведения дистанционных измерений, регистрации одновременно широкого спектра элементов, содержащихся в анализируемой жидкости. Одно из первых применений метода ЛИС для анализа элементов, присутствующих в морской воде в растворенном и взвешенном состоянии, было описано в работе [48]. Перспективы использования ЛИС для определения элементного состава морской воды упомянуты в работах [49, 50], основные принципы и характеристики метода ЛИС представлены в обзорах [51, 52].

Одним из главных факторов, ограничивающих широкое использование метода ЛИС для анализа жидкостей, является невысокая чувствительность, что делает затруднительным измерение элементного состава на уровне определения следовых концентраций (порядка микрограмм на литр и ниже). Так, при использовании одиночных лазерных импульсов наносекундной длительности для анализа жидких сред предел обнаружения составляет 10^{-2} – 10^{-4} г/л [48–52] в зависимости от исследуемого химического элемента. Вопрос о количестве элементов, которые можно зарегистрировать при конкретном способе возбуждения плазменного факела, зависит от характеристик лазерного излучения и применяемой регистрирующей аппаратуры.

Основным ограничением порога минимально обнаруживаемых концентраций элементов, содержащихся в жидкости, является наличие интенсивного непрерывного по спектру излучения плазмы, на фоне которого происходит регистрация эмиссионных линий элементов. Перспективы повышения чувствительности ЛИС связаны с увеличением контраста спектральных линий. Повышения контраста спектральных линий можно добиться использованием техники временной и пространственной селекции свечения эмиссионных линий исследуемых элементов на фоне излучения непрерывного спектра лазерной плазмы, а также техники многоимпульсного возбуждения лазерной плазмы [53–55].

Использование лазерных импульсов наносекундной длительности для генерации лазерной плазмы в совокупности с методами повышения контраста эмиссионных линий дает значение мини-

мально обнаруживаемых концентраций (МОК) элементов в морской воде на уровне 10^{-3} – 10^{-4} г/л. Эти значения надо рассматривать как предел метода ЛИС с наносекундными лазерными импульсами. Однако даже такие значения МОК позволяют использовать метод ЛИС для решения целого ряда океанологических задач [53, 56–58].

В клетках фитопланктона концентрация многих химических элементов значительно выше, чем в воде, к тому же клетки способны накапливать химические элементы и таким образом выступать в качестве индикаторов наличия химических элементов в морской воде, включая элементы-загрязнители. Методом ЛИС в клетках фитопланктона уверенно регистрируются эмиссионные линии Mg, Ca, Na, Fe, Si, Al, Zn, C [53].

При возбуждении лазерного пробоя импульсами субпикосекундной и фемтосекундной длительности термодинамические параметры плазмы в области пробоя существенным образом отличаются от таковых при использовании наносекундных лазерных импульсов. Температура и электронная плотность фемтосекундного оптического пробоя значительно ниже, что приводит к более низкой интенсивности непрерывного фона излучения плазмы, в спектре практически отсутствуют интенсивные линии ионов азота и кислорода [58]. Изменяется и временная зависимость сплошного и эмиссионного спектров излучения лазерной плазмы при переходе от наносекундной к фемтосекундной длительности [59]. Благодаря фемтосекундному возбуждению можно добиться большего контраста эмиссионных линий исследуемых элементов на фоне непрерывного спектра излучения и, следовательно, получить более низкие пределы обнаружения химических элементов.

В работе [59] впервые исследованы спектры ЛИС фемтосекундного пробоя на поверхности морской воды, возбуждаемого импульсами основной гармоникой Ti:Sa-лазера длительностью 50 и 650 фс. В спектрах ЛИС морской воды уверенно регистрируются эмиссионные линии элементов, входящих в макросостав, таких как H, Ca, Mg, Na, O, K. Показано, что использование временной селекции при проведении количественных измерений и фемтосекундного возбуждения лазерной плазмы позволяет получить предел обнаружения натрия в морской воде на уровне 10^{-6} г/л. Авторы работ [58, 60] показали, что использование фемтосекундного возбуждения в ЛИС дает возможность не только определять концентрацию химических элементов по эмиссионным спектрам атомов исследуемого образца, но и осуществлять регистрацию и идентификацию видового состава бактерий по эмиссионным молекулярным спектрам.

Таким образом, полученные в настоящее время МОК на уровне 10^{-5} – 10^{-6} г/л при использовании лазерных импульсов фемтосекундной длительности значительно расширяют круг задач, решаемых при использовании метода ЛИС в жидких средах, особенно это относится к задачам мониторинга

микро- и макросостава морской воды, клеток фитопланктона и загрязнения морских акваторий.

В настоящей статье приведены лишь некоторые приложения с использованием лазерных источников в исследовании океана, этот список можно значительно продолжить, и он постоянно расширяется. Довольно быстро развивающиеся лазерные технологии делают возможным использование в природных условиях лазеров с уникальными характеристиками, что позволяет приступать к решению новых задач в тех областях исследования океана, которые были недоступны ввиду отсутствия надежных методов измерения.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки (ГК № П163 от 16.07.2009, № 02.740.11.04.39 от 30.09.2009, № П1573 от 10.09.2009) и грантов Президента РФ (№ МК 4483-2009.5 и МК-860.2009.2)

1. *Bright D.* Hydrographic airborne laser sounder // Naval Eng. J. 1980. V. 92, N 2. P. 54–62.
2. *Abroskin A.G., Bunkin A.F., Vlasov D.V., Gorbunov A.L., Mirkamilov D.M.* Full-scale experiments with laser aerial sounding at the Chayka facility // Works of the General Physics Institute: Remote sensing of the ocean (Trudy IOFAN: Distantionnoye zondirovaniye okeana). 1986. V. 1. P. 29–47.
3. *Bukin O.A., Major A.Yu., Pavlov A.N., Shevtsov B.M., Kholodkevich E.D.* Measurement of the lightscattering layers structure and detection of the dynamic processes in the upper ocean layer by shipborne lidar // Int. J. Remote Sens. 1998. V. 19, N 4. P. 707–715.
4. *Hoge F.E., Wriglit C.W., Krabill W.B., Buntzen R.R.* Airborne lidar detection of subsurface oceanic scattering layers // Appl. Opt. 1988. V. 27, N 19. P. 3969–3977.
5. *Коханенко Г.П., Пеннер И.Э., Шаманаев В.С.* Авиалидарные исследования морской акватории. Ч. 1. Короткие трассы // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14, № 12. С. 1132–1136.
6. *Бекиев А.Ю., Фадеев В.В.* Влияние температуры, солей, кислот на форму линии комбинационного рассеяния воды // Докл. АН СССР. 1982. Т. 262, № 2. С. 328–331.
7. *Dyllis D.D.* A Raman technique for measurement of aqueous acid solution // Opt. Ing. 1974. V. 13, N 6. P. 502–505.
8. *Chang C.H., Young L.A.* Remote measurement of ocean temperature from depolarization in Raman scattering // The use of lasers for hydrographic studies. NASA SP-375 / Edited by H. Kim Hong Suk and Philip T. Ryan. 207 p. Publ. by NASA, Washington, D.C., 1975. P. 105.
9. *Hoge F.E., Swift R.N.* Airborne simultaneous spectroscopic detection of laser-induced water Raman backscatter and fluorescence of chlorophyll a and other naturally occurring pigments // Appl. Opt. 1981. V. 20, N 18. P. 3197–3205.
10. *Babichenko S., Poryvkina L., Arikese V., Kaitala S., Kuosa H.* Remote Sensing of Phytoplankton Using Laser-Induced-Fluorescence // Remote Sens. Environ. 1993. V. 45, N 1. P. 43–50.
11. *Barbini R., Colao F., Fantoni R., Palucci A., Ribezzo S.* Differential lidar fluorosensor system used for phytoplankton bloom and seawater quality monitoring in Antarctica // Int. J. Remote Sens. 2001. V. 22, N 2/3. P. 369–384.
12. *Алешин И.В.* Оптические методы и средства оперативного контроля экологического состояния морской среды // Оптич. ж. 2001. Т. 68, № 4. С. 27–36.
13. *Karpicz R., Dementjev A., Kuprionis Z., Pakalnis S., Westphal R., Reuter R., Gulbinas V.* Oil spill fluorosensing lidar for inclined onshore or shipboard operation // Appl. Opt. 2006. V. 45, N 25. P. 6620–6625.
14. *Brown E.D., Churnside J.H., Collins R.L., Veenstra T., Wilson J.J., Abnett K.* Remote sensing of capelin and other biological features in the North Pacific using lidar and video technology // ICES J. Marine Sci. 2002. V. 59. P. 1120–1130.
15. *Krekova M.M., Krekov G.M., Samokhvalov I.V., Shamanaev V.S.* Numerical evaluation of the possibilities of remote laser sensing of fish schools // Appl. Opt. 1994. V. 33, N 24. P. 5715–5720.
16. *Ott L.M.* Underwater ranging measurements using blue-green laser // NAVAIRDEVCON Report. 1965. N NADC-AE-6519. Naval Air Development Center, Warminster, PA.
17. *Sorenson G.P., Honey R.C., Payne J.R.* Analysis of the use of airborne laser radar for submarine detection and ranging // SRI Repor. 1966. N 5583. Stanford Research Institute.
18. *Ivanov A.P., Skrelin A.L., Sherbaf I.D.* Study of optical characteristics of water media using pulsed sounding // ZhPS. 1972. V. 17, N 2. P. 232–240.
19. *Carswell A.I., Sizgoric S.* Underwater probing with laser radar // The use of lasers for hydrographic studies. NASA SP-375 / Edited by H. Kim Hong Suk and Philip T. Ryan. 207 p. Publ. by NASA, Washington, D.C., 1975. P. 89.
20. *Hoge F.E., Swift R.N., Frederick E.B.* Water depth measurement using an airborne pulsed neon laser system // Appl. Opt. 1980. V. 19, N 6. P. 871–883.
21. *Bunkin A.F., Vlasov D.V., Galumyan A.S., Mal'tsev D.V., Mirkamilov D.M., Slobodyanin V.P.* Versatile airborne laser system for remote probing of ocean, atmosphere and farmland // Sov. Phys. Tech. Phys. 1984. V. 29, N 11. P. 1284–1287.
22. *Balandin V.N., Volodarskiy R.D.* Laser instruments for measuring the depth of shallow water // Geodeziya i kartografiya. 1979. N 2. P. 58–61.
23. *O'Neil R.A.* Field trials of a lidar bathymeter in the Magdalen islands // Proc. 4th Laser Hydro. Symp., ERL-0193-SD, Sept. 30–Oct. 3, 1980. Australian Defence Research Centre, Salisbury, South Australia. 1981. P. 56–84.
24. *Penny M.F.* Laser hydrography in Australia // Proc. Int'l. Conf. on Lasers '81, Dec. 14–18, 1981. 1981. P. 1029–1042.
25. *Steinwall O., Klevebrant H., Lexander J., Widen A.* Laser depth sounding in the Baltic Sea // Appl. Opt. 1981. V. 20, N 19. P. 3284–3286.
26. *Иванов А.П., Калинин И.И., Колесник А.И., Бондаренко П.П.* Особенности измерения показателей ослабления и поглощения воды методом импульсного зондирования // Ж. прикл. спектроскопии. 1986. Т. 29, № 4. С. 710–716.
27. *Браво-Животовский Д.М., Гордеев Л.Б., Долин Л.С.* Определение показателей поглощения света морской водой // Океанология. 1979. Т. 19, № 1. С. 168–174.
28. *Власов Д.В., Стрельцов В.Н.* Об учете влияния поверхностного волнения на временную структуру импульса эхо-сигнала мутности при измерении коэффициента рассеяния верхнего слоя океана методом лазерного аэрозондирования // Тезисы докл. на Всесоюз. семинаре-совещании «Проблемы лазерного аэро-

- зондирования поверхности Земли», Ташкент, 1984. С. 19–20.
29. Власов Д.В., Слободянин В.П., Стрельцов В.Н. О зависимости величины эхо-сигнала от глубины зондирования при регулярном волнении поверхности // Тезисы докладов на Всесоюз. семинаре-совещании «Проблемы лазерного аэрозондирования поверхности Земли». Ташкент, 1984. С. 27–28.
 30. Букин О.А., Ильичёв В.И., Майор А.Ю., Павлов А.Н., Стафиевский А.Г., Тяпкин В.А. Судовой гидролидарный комплекс для зондирования верхнего слоя океана // Оптика атмосф. и океана. 1994. Т. 7, № 10. С. 1403–1409.
 31. Фадеев В.В. Дистанционное лазерное зондирование фотосинтезирующих организмов // Квант. электрон. 1978. Т. 5, № 10. С. 2221–2226.
 32. Фадеев В.В., Чекалок А.М., Чубаров В.В. Нелинейная лазерная флуориметрия сложных органических соединений // Докл. АН СССР. 1982. Т. 262, № 2. С. 338–341.
 33. Dudelzak A.E., Babichenko S.M., Poryokina L., Wassmann P. Spectroscopic Lidar Sensing in Three-Dimensional Profiling of Marine Organics // Int. J. Remote Sens. 2001. V. 22, N 2&3. P. 385–402.
 34. Pogosyan S.I., Matorin D.N. Variability in the state of the photosynthetic system of the Black Sea phytoplankton // Oceanologia. 2005. V. 45, N 1. P. 139.
 35. Букин О.А., Салюк П.А., Майор А.Ю., Павлов А.Н. Исследование процессов воспроизводства органического вещества клетками фитопланктона методом лазерной индуцированной флуоресценции // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18, № 11. С. 976–982.
 36. Bukin O.A., Pavlov A.N., Permyakov M.S., Major A.Yu., Konstantinov O.G., Maleenok A.V., Ogay O.S.A. Continuous measurements of chlorophyll A concentration in the Pacific Ocean by shipborne laser fluorometer and radiometer: comparison with SeaWiFS data // Int. J. Remote Sens. 2001. V. 22, N 2&3. P. 415–427.
 37. Кульчин Ю.Н., Вознесенский С.С., Гамаюнов Е.Л., Гурин А.С., Коротенко А.А., Майор А.Ю. Погружной оптоволоконный флуориметр // Приборы и техн. эксперим. 2007. № 6. С. 117–122.
 38. Клышко Д.Н., Фадеев В.В. Дистанционное определение концентрации примеси методом лазерной спектроскопии по комбинационному рассеянию // Докл. АН СССР. 1978. Т. 238, № 2. С. 320–323.
 39. Карабашев Г.С. Флуоресценция в океане. Л.: Гидрометеониздат, 1987. 200 с.
 40. Falkowski P.G. & Raven J.A. Aquatic Photosynthesis: aquatic Princeton. Princeton: University Press., 2nd edition. January 22, 2007. 500 p.
 41. Биологическая продуктивность океана / Под ред. М.Е. Виноградова // Биология океана. Т. 2. М.: Наука, 1977. 399 с.
 42. Takahiko Kameda, Joji Ishizaka. Size-Fractionated Primary Production Estimated by a Two-Phytoplankton Community Model Applicable to Ocean Color Remote // Sens. J. of Oceanography. 2005. V. 61. P. 663–672.
 43. Букин О.А., Голик С.С., Салюк П.А., Бауло Е.Н., Ластовская И.А. К вопросу об эффективности возбуждения флуоресценции хлорофилла «А» лазерным излучением // Ж. прикл. спектроскопии. 2008. Т. 75, № 2. С. 224–228.
 44. Coble P.G. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy // Mar. Chem. 1996. V. 51, N 4. P. 325–346.
 45. Букин О.А., Голик С.С., Салюк П.А., Бауло Е.Н., Ластовская И.А. Изменение спектров лазерной индуцированной флуоресценции морской воды в процессе деградации растворенного органического вещества // Ж. прикл. спектроскопии. 2007. Т. 74, № 1. С. 103–107.
 46. Букин О.А., Пермяков М.С., Зенкин О.Л., Хованец В.А., Пузанков К.А., Буров Д.В., Салюк П.А. Сравнительный анализ результатов измерения концентраций хлорофилла «А», полученных с использованием данных сканера цвета морской поверхности SeaWiFS и методом лазерной индуцированной флуоресценции в Охотском море // Исслед. Земли из космоса. 2003. № 4. С. 84–90.
 47. Martin J.H., Coale K.H., Johnson K.S. et al. Testing the iron hypothesis in ecosystems of the equatorial Pacific Ocean // Nature. 1994. V. 371. P. 123–129.
 48. Букин О.А., Павлов А.Н., Сушилов Н.В., Эдуардов С.Л. Использование спектроскопии лазерной искры для анализа элементного состава водных сред // Ж. прикл. спектроскопии. 1990. Т. 52, № 5. С. 736–738.
 49. Прохоров А.М., Власов Д.В., Циценюк Д.Ю. Исследование возможности дистанционного определения содержания железа в морской воде по эмиссионному спектру лазерного пробоя // Ж. прикл. спектроскопии. 1991. Т. 55, № 2. С. 313–314.
 50. Власов Д.В., Прохоров А.М., Циценюк Д.Ю. Аналитические возможности элементного анализа водных растворов по эмиссионному спектру лазерного пробоя на поверхности // Ж. прикл. спектроскопии. 1991. Т. 55, № 6. С. 919–926.
 51. Rusak D.A., Castle B.C., Smith B.W., Winefordner J.D. Recent trends and future of laser-induced plasma spectroscopy // Trends in analytical chemistry. 1998. V. 17, N 8–9. P. 453–460.
 52. Pasquini C., Cortez J., Silva L., Gonzaga F. Laser Induced Breakdown Spectroscopy // J. Braz. Chem. Soc. 2007. V. 18, N 3. P. 463–512.
 53. Букин О.А., Алексеев А.В., Ильин А.А., Голик С.С., Царёв В.И., Бодин Н.С. Использование лазерной искровой спектроскопии с многоимпульсным возбуждением плазмы для мониторинга качества морской воды и состояния фитопланктона // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16, № 1. С. 26–32.
 54. Ильин А.А., Букин О.А., Буланов В.А., Нагорный И.Г., Голик С.С., Баулов Е.Н. Спектрально-временные характеристики плазмы, генерируемой на поверхности морской воды наносекундным лазерным импульсом // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 7. С. 705–709.
 55. Fiched P., Mauchien P., Wagner J.-F., Moulin C. Quantitative elemental determination in water and oil by laser induced breakdown spectroscopy // Anal. chim. acta. 2001. V. 429, N 2. P. 269–278.
 56. Букин О.А., Салюк П.А., Майор А.Ю., Голик С.С., Ильин А.А., Буланов А.В., Бауло Е.Н., Акмайкин Д.А. Использование методов лазерной спектроскопии при исследовании элементов углеродного цикла в океане // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 3. С. 229–234.
 57. Barbini R., Colao F., Lazic V., Fantoni R., Palucci A., Angelone M. On board LIBS analysis of marine sediments collected during the XVI Italian campaign in Antarctica // Spectrochim. Acta. B. 2002. V. 57, N 7. P. 1203.

58. *Baudelet M., Guyon L., Yu J., Wolf J.-P., Amodeo T., Frejafon E., Laloï P.* Femtosecond time-resolved laser-induced breakdown spectroscopy for detection and identification of bacteria: A comparison to the nanosecond regime // *J. Appl. Phys.* 2006. V. 99. P. 084701-1–084701-9.
59. *Букин О.А., Голык С.С., Ильин А.А., Кульчин Ю.Н., Соколова Е.Б., Бауло Е.Н.* Лазерная искровая спектроскопия жидких сред с возбуждением импульсами фемтосекундной длительности // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22, № 3. С. 296–300.
60. *Guyon L., Baudelet M., Amodeo T., Frejafon E., Laloï P., Yu J., Wolf J.-P.* Laser-Induced Breakdown Spectroscopy analysis of Bacteria: What Femtosecond Lasers Make Possible // *Ultrafast Phenomena XV.* Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. V. 88. P. 193–195.

O.A. Bukin, A.N. Pavlov, P.A. Salyuk, S.S. Golik, A.A. Il'in, A.Yu. Bubnovskiy. **Laser technologies of the ocean research.**

The modern laser technologies of investigation of the Ocean are presented. The development results of the laser methods for lidar sounding of upper ocean layer, monitoring of phytoplankton communities, and measuring the element concentration are discussed. The description of ship-borne lidar hydro complex allowing the retrieval of back scattering structure layer and internal waves is given. Main results of laser-induced fluorometry usage for phytoplankton communities monitoring, undersatellite ocean color validation, and regional algorithms for chlorophyll A retrieval were under consideration. Key outcomes from laser induced breakdown spectroscopy methods development with the use of laser impulse of nanosecond and femtosecond lengths to qualify elements concentration included in sea waters composition and phytoplankton are given.