

Академик РАН Ф.В. Бункин, А.Ф. Бункин

## Лидарное зондирование водоемов, почвы и растительности

Институт общей физики РАН, Научный центр волновых исследований, г. Москва

Поступила в редакцию 20.12.99 г.

Представлены результаты лабораторных и натурных экспериментов, демонстрирующих возможности применения разработанного авторами универсального лидара для эффективного контроля экологического состояния водоемов, наземной растительности и почвы.

В частности, параллельное измерение спектров флуоресценции почвы, наземной растительности и морской воды показало полное соответствие основных спектральных особенностей этих объектов. Обнаружена временная изменчивость спектров эхосигнала проб морской воды, что указывает на актуальность экспрессного анализа водных сред *in situ*.

### Введение

Быстрый рост загрязнения окружающей среды обуславливает повышенный интерес к развитию методик и аппаратуры для экспрессного измерения содержания примесей в атмосфере, водоемах, почве и растительности. Эффективным подходом к решению такого рода задач является использование лидарных методов [1–3], позволяющих получать в реальном времени достаточно полную информацию об исследуемой среде, в том числе с борта авианосителя [2–4]. Такие измерения часто используются для калибровки спутниковых изображений поверхности Земли [5,6]. Однако большинство существующих в настоящее время лидарных систем являются громоздкими и недостаточно универсальными. Нами создан компактный флуоресцентный лидар, который можно применять для зондирования водоемов, почвы и растительности с борта вертолетов, автомобилей и судов. Некоторые результаты натурных и лабораторных экспериментов, иллюстрирующие возможности такого зондирования, являются предметом данной работы.

### Эксперимент

Оптическая схема лидара приведена на рис. 1. В качестве излучателя использовался специально разработанный устойчивый к вибрациям Nd:YAG-лазер со следующими параметрами:

длительность импульса	8 нс
частота повторения импульсов	до 25 Гц
энергия в импульсе основного излучения (1064 нм)	600 мДж
энергия в импульсе второй гармоники (532 нм)	280 мДж
энергия в импульсе третьей гармоники (354 нм)	100 мДж

Металлическое зеркало 7 направляет зондирующее излучение на исследуемый объект (водоем, почву, растительность). Это же зеркало отклоняет регистрируемый эхосигнал в приемный зеркальный телескоп 6 (относительное отверстие 1/3, диаметр 200 мм). Далее эхосигнал через специальное устройство ввода 4 фокусируется на

входную щель полихроматора 5, собранного по автоколлимационной схеме. В полихроматоре используются дифракционные решетки 300 и 1200 штр./мм, дисперсия полихроматора (решетка 300 штр./мм) в первом порядке дифракции 42 нм/мм и в девятом 2 нм/мм.

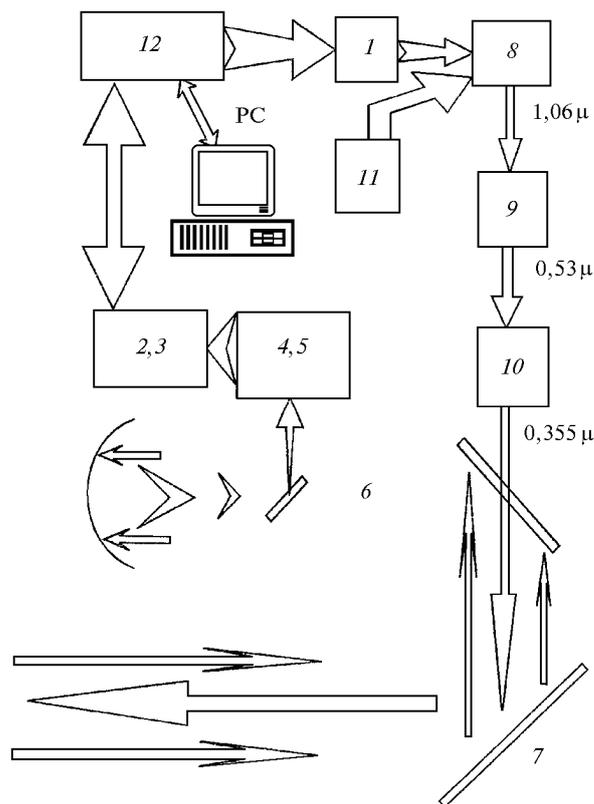


Рис. 1. Схема лидара

На выходе полихроматора спектры эхосигнала регистрируются охлаждаемой линейкой ПЗС 3 (1024 элемента, спектральная область чувствительности на уровне 10 фотонов/отсчет 350–900 нм). Предварительное усиление яркости (до  $3 \cdot 10^4$ ) осуществляется с помощью электронно-

оптического преобразователя (ЭОП) 2 (2, 3 – ПЗС-камера с предварительным усилителем яркости), с выхода которого изображение спектра переносилось на вход линейки ПЗС широкоугольным объективом. Усиление в ЭОП происходит в момент подачи строб-импульса (в наших экспериментах длительностью 1 мкс), что наряду с аппаратным вычитанием шумов позволяет регистрировать спектры эхосигнала при любых уровнях солнечной освещенности.

В первом порядке дифракции полихроматора (решетка 300 штр./мм) рабочий диапазон составляет 525 нм, спектральное разрешение около 0,5 нм/канал, что вполне достаточно для регистрации спектров флуоресценции загрязняющих примесей в водоемах. Конструкция полихроматора позволяет использовать первые девять порядков дисперсии и доводить спектральное разрешение до 0,022 нм/канал, что дает возможность, например, регистрировать тонкую структуру эмиссионных спектров лазерной плазмы [4].

Работа линейки ПЗС и усилителя яркости управляется специализированным процессором 12, осуществляющим первичную обработку и накопление спектров, которые затем транслируются в IBM – совместимый компьютер. Процессор 12 управляет также работой блока питания Nd:YAG-лазера 1 (на рис. 1 11 – система охлаждения лазера, 8 – излучатель на кристалле Nd:YAG, 9, 10 – генераторы второй и третьей гармоник соответственно).

Были проведены четыре типа экспериментов:

- в лабораторных условиях исследовались образцы воды, почвы, растительности,
- в натурных условиях (in situ) регистрировались спектры аналогичных образцов,
- из окна лаборатории с различных дистанций регистрировались спектры флуоресценции различных типов растительности (в основном деревьев),
- с борта исследовательского судна картировалось распределение загрязнений в прибрежной зоне Атлантического океана (район Рио-де-Жанейро).

Во всех экспериментах в качестве зондирующего излучения использовались вторая или третья гармоники Nd:YAG-лазера, которые возбуждали флуоресценцию и спектры КР света в исследуемых объектах.

При калибровке лидара были получены спектры эхосигнала образцов морской воды из прибрежной зоны Атлантического океана, отобранные в двух районах г. Рио-де-Жанейро, и дистиллированной воды с удельным сопротивлением 14 МОм/см. Были зарегистрированы пики флуоресценции растворенного органического вещества (РОВ) (максимум 590 нм), хлорофилла А фитопланктона (максимум 685 нм) и пик комбинационного рассеяния (КР) света (650 нм) валентных колебаний молекул воды. Концентрация примеси каждого типа может быть определена из измерения отношения пиков флуоресценции и КР [1–3].

На рис. 2 приведены спектры флуоресценции образцов почвы Бразилии, растительности и морской воды при возбуждении излучением третьей гармоники Nd:YAG-лазера, отнормированные для количественного сопоставления на сигнал упругого рассеяния зондирующего излучения ( $\lambda = 355$  нм). Видно, что при качественном совпадении формы спектров эхосигнала различных образцов величины пиков флуоресценции пигментов существенно отличаются, что позволяет проводить сравнение почв по содержанию органических примесей и минеральному составу. В частности, из рис. 2,а видно, что в образцах почвы, взятых с верхнего горизонта, существенно больше сигналы флуоресценции фикоэритрина (вблизи 630 нм) и хлорофилла

(вблизи 700 нм) по сравнению с сигналами нижнего горизонта. Разница амплитуд эхосигналов характеризует содержание органического вещества в плодородном слое почвы.

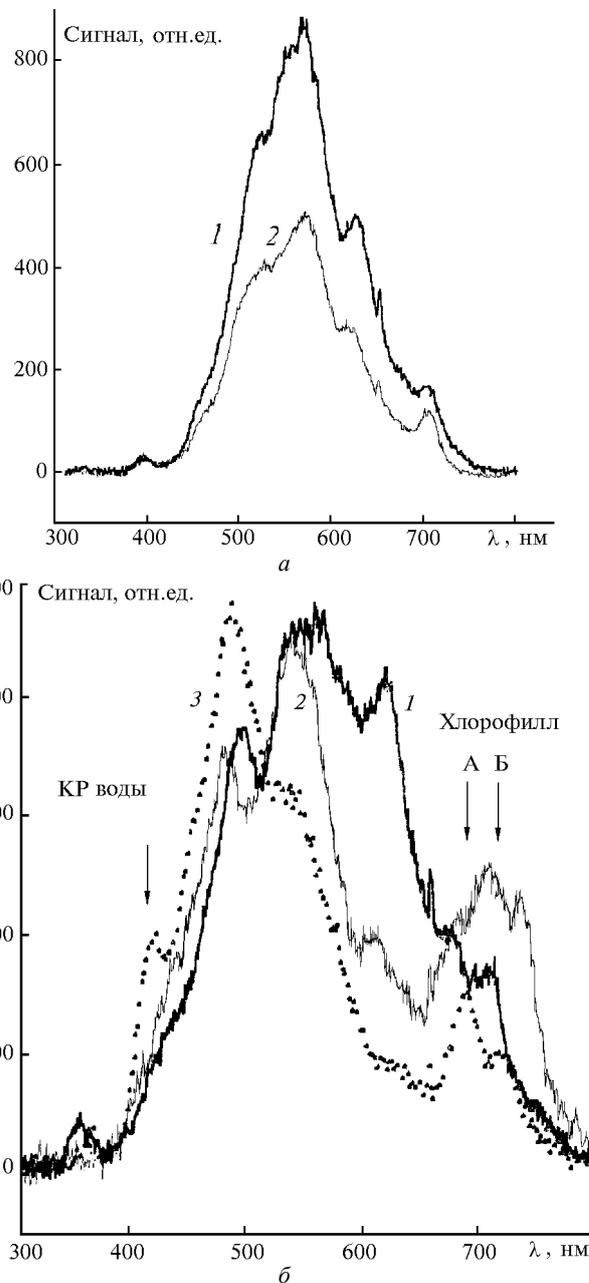


Рис. 2. Примеры спектров эхосигнала из почв. Коррекция на спектр пропускания отрезающего светофильтра БС-7 не проводилась: а – почва из штата Amazone (кривая 1 – глубина 0–6 см; 2 – глубина 92–134 см); б – сравнение спектров эхосигнала почвы – 1, листьев дерева – 2 и морской воды – 3

На рис. 2,б приведены спектры эхосигнала образца почвы (из штата Mato Grosso do Sul), воды Атлантического океана и листьев дерева *Pao Brazil*. Видно, что спектры почвы, морской воды и растительности имеют сходную структуру, при этом в спектре воды дополнительно появляются пики КР валентных О–Н колебаний молекул воды ( $\lambda = 407$  нм), а в спектре растительности сильнее проявляется сигнал флуоресценции хлорофиллов А и Б ( $\lambda = 690$  и

740 нм). Количественное совпадение спектрального положения всех основных максимумов флуоресценции минеральных компонентов и органических примесей образцов почв, морской воды и растительности является, по-видимому, фундаментальным свойством земной поверхности и указывает на глубокую связь химического состава верхнего слоя суши, морской воды и наземной растительности.

Важным приложением этой методики в натурных исследованиях является дистанционное распознавание растений. Было проведено зондирование различных тропических деревьев, растущих на склонах гор в окрестностях Папского католического университета г. Рио-де-Жанейро (PCU Rio), из окна лаборатории. Дальность до объектов варьировалась от 40 до 550 м, контроль расстояний осуществлялся путем независимых измерений с помощью лазерного дальномера. Излучение второй гармоники Nd:YAG-лазера ( $\lambda = 532$  нм) визуальное наводилось на кроны деревьев, и записывались спектры эхосигнала. Время накопления спектров не превышало 5 с, некоторые примеры полученных спектров приведены на рис. 3.

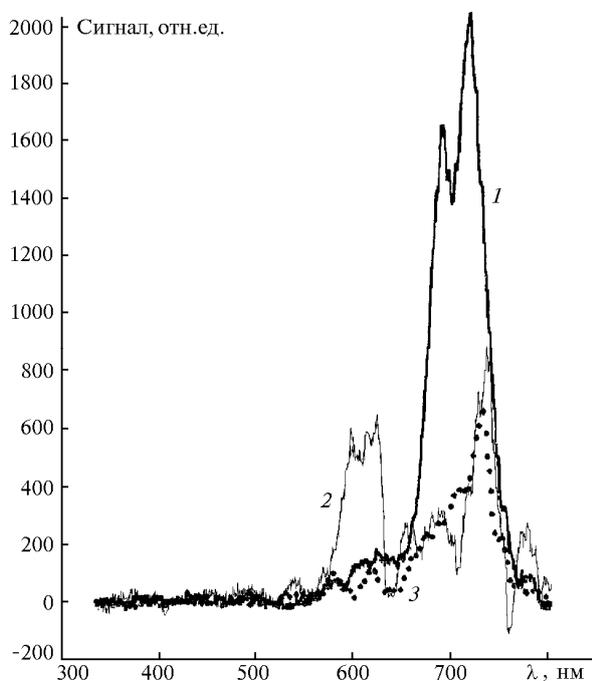


Рис. 3. Дистанционное распознавание типов и состояния растительности по спектрам флуоресценции, возбужденным лазерным излучением на расстоянии ~ 500 м. Сплошная кривая 1 – лиственное дерево, кривые 2 и 3 – пальмы. Заметны вариации формы спектров сигналов от образца к образцу

Из рис. 1 – 3 видно, что спектры флуоресценции разных пород деревьев существенно отличаются по форме, при этом эхосигнал регистрируется на дистанциях до 530 м. Таким образом, с помощью этой методики появляется возможность дистанционного распознавания и контроля состояния отдельных деревьев, что может оказаться полезным для оценки состояния лесов и их видового состава.

Задача картирования загрязнений мирового океана является актуальной в связи с участвующимися неконтролируемыми выбросами в окружающую среду отходов промышленных предприятий, продуктов жизнедеятельности городов, а также авариями на транспорте. Лидарная техника,

позволяющая проводить экспрессные измерения загрязнений воды *in situ*, дает неоспоримые преимущества перед любыми традиционными химическими методами анализа. В первую очередь это вызвано тем, что химический состав пробы морской воды довольно быстро меняется со временем и уже через несколько часов (характерное время, необходимое для доставки образца в лабораторию и его химический анализ) спектр флуоресценции пробы воды может отличаться от первоначального, полученного непосредственно после отбора.

Характерный вид спектров эхосигнала, полученных в ходе натурального эксперимента, проведенного на побережье Атлантического океана совместно с муниципальной службой контроля состояния воды г. Рио-де-Жанейро (FEEMA), приведен на рис. 4, где сплошная кривая – район Flamengo, штриховая кривая – район Botafogo, пунктирная кривая – спектр дистиллированной воды. Стрелками отмечены характерные области сигналов флуоресценции органических примесей и хлорофилла А фитопланктона, а также сигнал КР валентных колебаний молекул воды. Нормировка сигналов флуоресценции на сигнал КР позволяет сопоставлять концентрации флуоресцирующих примесей в различных образцах воды. Видно, что образец дистиллированной воды содержит относительно высокую концентрацию органических примесей.

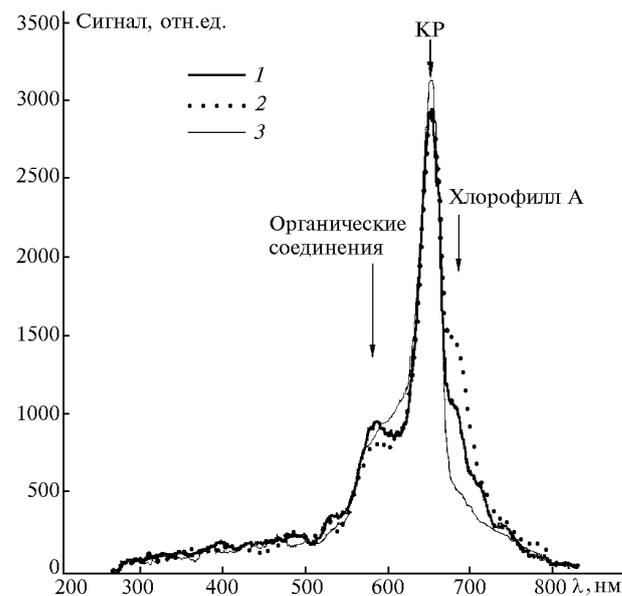


Рис. 4. Спектры лидарных эхосигналов образцов воды, полученных на побережье Атлантического океана в различных районах г. Рио-де-Жанейро при возбуждении второй гармоникой Nd:YAG-лазера ( $\lambda = 532$  нм)

Лидарный комплекс был смонтирован внутри микроавтобуса, поэтому имелась возможность проводить измерения как непосредственно в момент отбора проб, так и через некоторое время. Вода заливалась в кварцевый сосуд, зондирующее излучение лазера направлялось в сосуд сверху через открытую поверхность с помощью металлического зеркала. Автобус двигался вдоль побережья с остановками для отбора проб через 2–3 км.

Из рис. 4 видно, что спектры эхосигнала от образца к образцу обладают большой изменчивостью как по амплитудам флуоресценции хлорофилла (пик  $\lambda = 685$  нм), так и

по растворенной органике ( $\lambda = 590$  нм). Это отражает изменчивость содержания загрязняющих примесей и в целом химического состава исследованных проб воды. Через 2 ч после отбора пробы спектры эхосигнала тех же образцов были получены повторно. Оказалось, что форма спектра существенно изменилась.

Этот факт иллюстрируется рис. 5, где представлены результаты измерений *in situ* относительных концентраций органических примесей и хлорофилла А в пробах морской воды из различных районов Рио-де-Жанейро (по оси абсцисс отложены относительные величины

сигнала флуоресценции хлорофилла, по оси ординат – относительные сигналы флуоресценции растворенной органики). Видно, что во всех случаях величины сигналов флуоресценции, нормированные на амплитуду сигнала КР ( $\lambda = 655$  нм), трансформируются (соответствующие вариации показаны стрелками), что свидетельствует об изменении концентрации соответствующих пигментов. Поэтому истинную картину загрязнения акватории можно получить только с помощью лидарных измерений на борту судна или авианосителя.

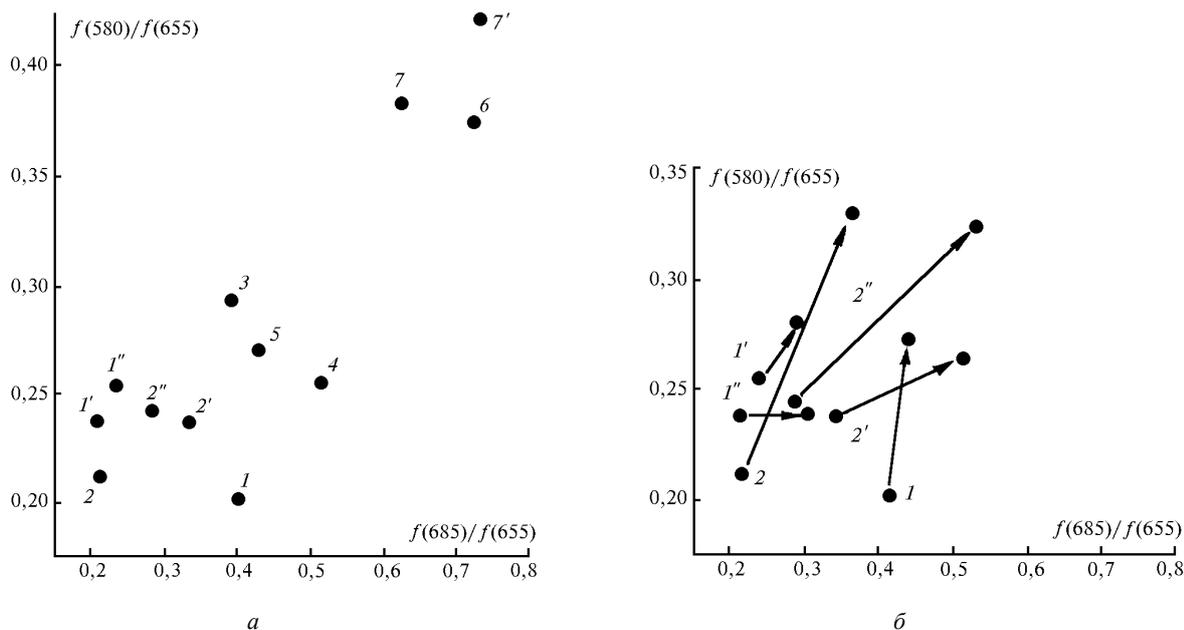


Рис. 5. Разброс относительных концентраций хлорофилла А (ось абсцисс) и растворенного органического вещества (ось ординат) в образцах воды Атлантического океана, отобранных в различных районах г. Рио-де-Жанейро 27.01.97: 1 – Пере, 1' – Перипо, 1'' – Н.Национал, 2 – Леблон, 2' – В. де Албукерке, 2'' – В. Митре, 4 – Сопасабана, 6 – Ботафого, 7 – Фламенго, 7' – Глория; а – результаты измерения непосредственно после отбора проб; б – результаты измерения через 2 ч показаны стрелками

В развитие этих исследований нами была проведена морская экспедиция в районе порта Макае, штат Рио-де-Жанейро, Бразилия. Лидарный комплекс был установлен в контейнерной лаборатории на палубе небольшого судна (водоизмещение около 500 т), расстояние между приемным телескопом и поверхностью воды не превышало 50 м. Судно курсировало вдоль берега (максимальное удаление в море 20 миль), пересекая устье реки, районы подводных нефтяных трубопроводов, а также области интенсивного движения судов. Некоторые примеры спектров эхосигнала, полученных в ходе натурального эксперимента, приведены на рис. 6.

На рис. 6,а показаны спектры эхосигнала при удалении судна от берега. Пики слева направо соответствуют сигналам флуоресценции растворенной органики, КР – воды и флуоресценции хлорофилла. Видно, что с течением времени (по мере удаления от берега) падает концентрация РОВ и хлорофилла. Сигналы флуоресценции хлорофилла А ( $\lambda = 685$  нм) и растворенной органики ( $\lambda = 580$  нм) быстро убывают, тогда как сигнал КР воды ( $\lambda = 650$  нм) остается

неизменным. На рис. 6,б продемонстрированы примеры спектров эхосигнала (при возбуждении третьей гармоники Nd:YAG-лазера,  $\lambda = 355$  нм), полученные в районе возможных антропогенных загрязнений океана, поскольку в этой области происходит вынос в океан вод реки, протекающей вблизи промышленных объектов. Там же находятся нефтяные терминалы, проходят подводные трубопроводы. Судно двигалось в области перемешивания речной и океанической воды, скорость судна 7 узлов. Видно, что форма спектра эхосигнала быстро меняется, в спектре присутствуют компоненты, соответствующие минеральным и органическим примесям заборной воды, а также пики флуоресценции фитопланктона (в области 600–800 нм). Характерно, что концентрация и состав растворенного органического вещества, а также и содержание хлорофилла А в обследованном районе испытывают существенные вариации (спектры записаны с интервалом 3 мин), что свидетельствует о возможности существования антропогенных источников загрязнений в обследованном районе во время наших измерений.

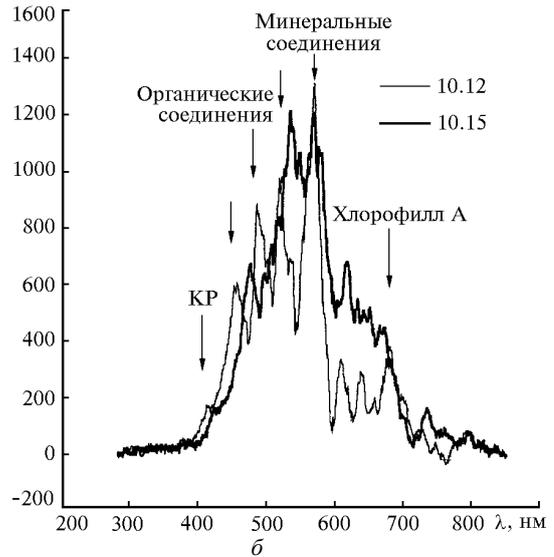
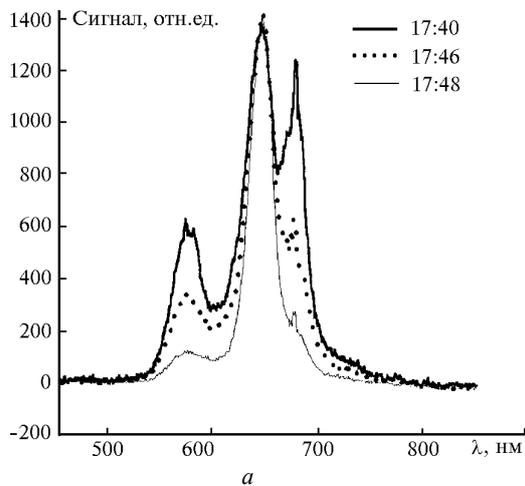


Рис. 6. Спектры эхосигнала из морской воды, зарегистрированные на борту судна в Атлантическом океане (район г. Макао) 12 и 13.05.97 г. (справа сверху указано местное время): а – спектры эхосигнала при зондировании излучением второй гармоники Nd:YAG-лазера; б – спектры эхосигнала при зондировании излучением третьей гармоники Nd:YAG-лазера

Отдельной задачей океанологии является глобальный мониторинг температуры верхнего слоя океана. Эти измерения являются актуальными как в связи с повседневной необходимостью метеопрогнозов, так и благодаря существованию глобальной проблемы потепления климата. В настоящее время большая часть измерений температуры воды производится контактно с помощью буев, передающих информацию на спутники или береговые станции. Ввиду ограниченного количества буев и сравнительно небольшого срока их службы эти измерения носят фрагментарный характер и не могут охватить всю акваторию Мирового океана. Из дистанционных методов зондирования, пригодных для использования с борта авианосителя (или из космоса), можно отметить методы, основанные на измерении яркостной температуры поверхности воды с помощью радиометров (см., например, [5]). Однако этим способом можно измерить лишь температуру тонкого слоя воды (толщиной не более нескольких десятков микрон), которая сильно зависит от климатических условий в момент измерений (состояния облачности, поверхностного волнения, скорости испарения воды, осадков) и поэтому существенно отличается от реальной, «физической» температуры верхнего слоя океана.

Альтернативой последнему методу является другой, ранее предложенный в [6], дистанционный способ измерения температуры Мирового океана, основанный на температурной зависимости формы полосы КР света валентных O–H колебаний воды. Согласно [6], если контур этой полосы КР разложить на составляющие и в процессе натуральных экспериментов отслеживать изменения спектроскопических параметров отдельных линий КР, образующих эту полосу, сравнивая их с данными лабораторных измерений, то можно достичь точности измерения «физической» температуры водоема 1–2 °С. Однако на практике оказалось, что разложение на составляющие контура полосы КР валентных O–H колебаний воды является неоднозначной процедурой, особенно в случае натуральных измерений, когда на регистрируемый спектр накладываются солнечные засветки и сигнал флуоресценции органических примесей морской воды в

стоксовой области спектра. Поэтому, вероятно, этот метод не нашел распространения в океанографической практике.

В нашей недавней работе [7] предложен и проверен в лабораторных условиях способ дистанционного бесконтактного измерения температуры воды (в том числе морской воды), основанный на специальной процедуре обработки контура полосы КР валентных колебаний молекул воды, не связанный с разложением контура на отдельные составляющие.

Во время судовой экспедиции была проведена проверка возможности дистанционного измерения температуры океана в натуральных условиях. На рис. 7 показаны спектры полосы КР валентных колебаний заборной воды, записанные с интервалом 1 мин с расстояния 50 м (волнение около 2 баллов, скорость судна 8 узлов), эффективная расчетная глубина зондирования 50 см, измерения проводились в четвертом порядке дисперсии полихроматора. Особенности на крыльях спектров (см. рис. 7) вызваны вкладами флуоресценции растворенных органических примесей и хлорофилла А фитопланктона, пунктирная кривая – аппроксимация полосы КР лоренцевым контуром.

Параллельно температура верхнего слоя океана контактно измерялась электронным термометром с калиброванным терморезистором. Измерения показали, что температура океана колеблется от 21 до 25 °С (эти колебания можно объяснить различной глубиной погружения термодатчика в условиях волнения при движении судна). В соответствии с результатами наших лабораторных экспериментов [7] центр аппроксимирующего контура при нагревании воды смещается в стоксову область на  $1 \text{ см}^{-1}/\text{град}$ . Зафиксированный в натурном эксперименте разброс спектрального положения центров огибающих полосы КР валентных колебаний молекул воды не превышал  $5 \text{ см}^{-1}$  (в частности, на рис. 7, он составляет  $2,7 \text{ см}^{-1}$ ), т.е. согласуется с измеренным терморезистором разбросом температуры верхнего слоя океана. Более точные контактные измерения вертикального профиля температуры океана, по-видимому,

позволят в последующих натуральных экспериментах сделать окончательный вывод о пригодности предло-

женного способа для дистанционного измерения температуры водоемов.

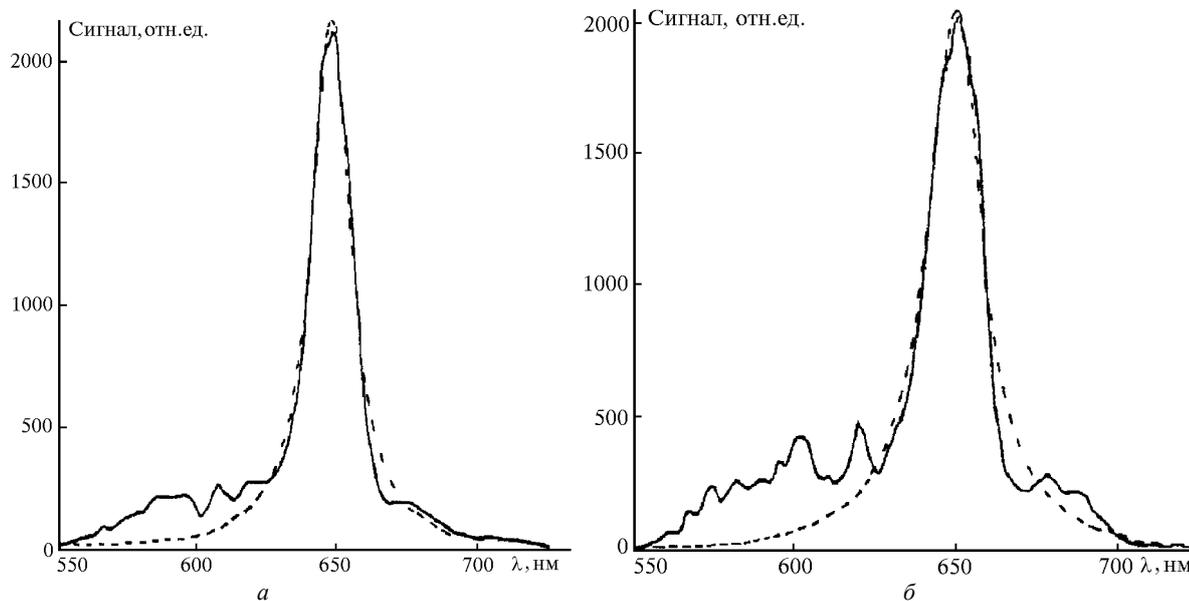


Рис. 7. Примеры лидарных спектров КР океанической воды, записанных на борту судна при зондировании излучением второй гармоники Nd:YAG-лазера (четвертый порядок дифракции полихроматора). Пунктиром нанесены аппроксимирующие кривые лоренцевой формы: *а* и *б* соответственно местное время измерения 11:09 и 11:08, центр лоренцевой кривой 648,36 и 648,48 нм, температура забортной воды (по измерению термоматчиком) 24,6 и 24,9 °С

### Заклучение

Таким образом, в ходе наших экспериментов было показано, что созданный нами лидар одинаково успешно решает широкий круг задач, возникающих в процессе экологического мониторинга суши и Мирового океана. Этот лидар может быть установлен на авианосителях (самолетах, вертолетах), автомобилях и судах.

Параллельное измерение спектров флуоресценции почвы, наземной растительности и морской воды выявило полное соответствие основных спектральных особенностей этих объектов. Дистанционное лазерное распознавание видов деревьев и наличия стрессов у растений может успешно применяться при глобальном мониторинге лесов, а также для рутинного контроля экологического состояния национальных парков. Временная изменчивость спектров эхосигнала проб морской воды указывает на необходимость экспрессного анализа водных сред *in situ*, что повышает актуальность дистанционных лазерных измерений состояния объектов окружающей среды, особенно в труднодоступных регионах.

Использование описанного выше лидара открывает реальную возможность (при использовании спутниковой навигационной системы) создания «мгновенных» (в масштабе характерных времен эволюции состояния верхнего слоя океана) карт загрязнения больших акваторий водоемов в зонах промышленных катастроф, вблизи больших городов, судоходных трасс и на других территориях, где требуется оперативная информация об экологическом состоянии водной среды.

*F.V. Bunkin, A.F. Bunkin. Lidar sensing of water, ground, and plant surfaces.*

The results of laboratory and field experiments demonstrating applicability of general-purpose lidar, designed by the authors, to water, soil, and ground plants monitoring, are presented in the paper.

In particular, parallel measurements of the soil, ground plants, and see water fluorescence spectra has shown a good correlation between main spectral peculiarities of these objects. The temporal variability of the see water returns spectra has been found, underlying an importance of *in situ* water media express-analysis.

Авторы выражают персональную благодарность профессорам Р.А. Нунесу и Л.С. Скаварда де Кармо (PCU, Rio), а также сотрудникам этого университета И. Карвальо и Р. Табаресу за помощь и поддержку в работе.

Работа была выполнена при частичной финансовой и организационной поддержке государственных учреждений Республики Бразилия CNPq, FEEMA, EMBRAPA и PetroBraz, Российских государственных программ «Фундаментальная метрология» и «Фундаментальная спектроскопия», а также Российского фонда фундаментальных исследований, гранты № 99-02-16591 и 98-02-16074.

1. *Measures R.M.* Laser Remote Sensing Fundamentals and Applications. John Wiley & Sons New York–Toronto–Singapore, 1985. 542 p.
2. *Бункин А.Ф., Власов Д.В., Миркамлилов Д.М.* Физические основы лазерного аэрозондирования поверхности земли. Ташкент: ФАН, 1987. 271 с.
3. *Hoge F.E., Swift R.N.* // *Appl. Opt.* 1981. V. 20. N 18. P. 3197–3205.
4. *Bunkin A.F., Davydov M.A., Rezov A.V., Surovegin A.L., Tsipenyuk D.Yu.* // *Laser Physics.* 1994. V. 4. N 6. P. 1198–1201.
5. *Smith R.C., Brown O.B., Hoge F.E. et al.* // *Appl. Opt.* 1987. V. 26. N 11. P. 2068–2081.
6. *Hoge F.E., Wright C.W., Swift R.N.* // *Appl. Opt.* 1987. V. 26. N 11. P. 2082–2094.
7. *Chedin A., Scott N.A., Berroin A.* // *J. Appl. Meteorol.* 1982. V. 21. N 4. P. 613–618.
8. *Leonard D.A., Caputo B., Hoge F.E.* // *Appl. Opt.* 1979. V. 18. P. 1732.
9. *Bunkin A.F., Pershin S.M.* // *BRAS. Physics of Vibrations.* 1997. V. 61. N 3. P. 158–163.