

СУДОВОЙ ЛИДАР ДЛЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

© 2008 г. **А. И. Степанов***, доктор техн. наук; **С. А. Рогов****, доктор физ.-мат. наук; **С. Н. Карпов***, **В. А. Кондрашов***, доктор техн. наук; **С. А. Мальков*****, канд. техн. наук; **С. И. Сачава***, канд. техн. наук; **М. С. Самарцев***; **Л. А. Спивак***; **В. А. Тершуков***

* НТЦ “Электрозонд”, Санкт-Петербург

** Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург

*** ЗАО НПП “Авиационная и морская электроника”, Санкт-Петербург

Описана схема судового лидара, предназначенного для исследования моря в интересах экологии и батиметрии. Приведены результаты натуральных наблюдений с помощью лидара верхних слоев моря и его дна. Показана возможность обнаружения рассеивающих образований в воде и регистрации профиля дна моря на глубине более 50 м.

Коды OCIS: 140.0140.

Поступила в редакцию 18.09.2007.

Введение

Дистанционное зондирование верхнего слоя океана в оптическом диапазоне длин волн все больше используется для измерения гидрооптических параметров морской воды [1–4], картографирования рельефа прибрежных районов морского дна [5], разведки косяков рыбы [6], изучения экологической обстановки на море [7]. Известно, что большое значение для экономики имеют проекты освоения нефтегазовых месторождений на Арктическом шельфе. Такие проекты тесно связаны с работами по гидрографическому обследованию морского дна и экологическому мониторингу акваторий с помощью различных оптических средств, включая зондирование водной среды с использованием лидаров.

Реализуются различные схемы построения лидаров. Разрабатываются приборы, использующие в качестве информативного признака интенсивность рассеянного назад лазерного излучения. Предложены телевизионные и оптико-электронные системы с лазерной подсветкой, строящие изображения.

Аппаратура размещается на различных носителях. Лидары, базирующиеся на авиационных носителях, позволяют быстро обследовать большие морские акватории [8, 9]. Однако размещение лидара на летательном аппарате сопряжено с техническими сложностями из-за значительных габаритов оптической системы. Установка лидара на судне [3] проще и не требует специальных мер по миниатюризации аппаратуры. Кроме того, достоинством судовых лидаров является возможность устранения оптической помехи, обычно возникающей при прохождении лазерного излучения через взволнованную поверхность, путем погружения иллюминаторов лидара ниже границы раздела воздух–вода.

Наибольшее распространение получили импульсные лидары, построенные по схеме регистрации потока рассеянного назад лазерного излучения, позволяющие зондировать океан на различных глубинах. Принцип действия такого лидара состоит в излучении в толщу воды коротких световых импульсов в узком телесном угле и приеме сигналов обратного рассеяния, несущих информацию о распределении рассеивающих или отражающих свет образований. В связи с сильным поглощением и рассеянием света в воде сигнал обратного рассеяния быстро затухает во времени (по глубине). Максимальная глубина зондирования определяется показателями ослабления и рассеяния сигнала в водной среде, энергией излучаемых импульсов, солнечной засветкой и шумами системы и может составлять 50–100 м и более, о чем свидетельствуют результаты экспериментальных исследований в океане [10, 11].

Возможностью регистрировать более широкий набор параметров среды обладают так называемые поляризационные лидары. С помощью поляризационного лидара можно получать не только распределение показателя обратного рассеяния по глубине, как в простом импульсном лидаре, но и распределение степени деполяризации и полного показателя рассеяния. Считается, что эти параметры более чувствительны к неоднородностям водной среды [9, 12].

Целью настоящей работы являлась оценка возможности использования новой разработки судового лидара со свойствами поляризационного лидара для ведения экологического мониторинга поверхностных слоев воды и зондирования морского дна. В работе рассмотрены результаты исследования с помощью этого лидара оптических характеристик верхнего слоя воды в различных условиях.

Описание устройства

На рис. 1 приведена структурно-функциональная схема лидара, на которой показано размещение блоков лидара на судне. Лазер лидара 1 находился на палубе, его излучение выводилось в воду через трубу 2 с иллюминатором 4 на уровне днища судна. Труба располагалась в вертикальном проеме 3 в корпусе судна. Фотоприемное устройство (ФПУ) 5 в герметичном корпусе располагалось в другом проеме 6 в погруженном в воду положении. Рассеянное лазерное излучение из водной среды поступало в ФПУ через иллюминатор 7. Расстояние между центрами иллюминаторов излучателя и ФПУ (база лидара) было выбрано равным 1 м, что позволило снизить динамический диапазон регистрируемых оптических сигналов при верхней границе зондируемого слоя примерно 8 м.

Блок синхронизации и управления работой лидара 18 и компьютер 17, используемый для проведения предварительной обработки сигналов обратного рассеяния и выдачи команд на управление, находились в служебных помещениях. Связь ФПУ с блоком управления и синхронизации, а также передача сигналов обратного рассеяния после оцифровки к компьютеру проводилась по герметичному электрическому кабелю.

В лидаре использовался лазер с длиной волны излучения 532 нм на иттрий-алюминиевом гранате, активированном неодимом, с нелинейным преобразованием излучения во вторую гармонику. Схема лазерного излучателя обеспечивала на его

выходе линейную поляризацию излучения. Энергетическая расходимость излучения составляла примерно 6 мрад. Мощность излучения в импульсе могла регулироваться от одного до тридцати мегаватт. Длительность импульсов $\tau \approx 10$ нс обеспечивала разрешающую способность лидара по глубине около 2 м. При частоте повторения импульсов излучения 5 Гц и скорости судна $v \approx 6$ узлов разрешение по ходу судна на глубине 10 м оценивалось приблизительно в 1 м.

ФПУ лидара включало 4 измерительных тракта: два грубых и два чувствительных, по одному для каждой из двух поляризаций принимаемого излучения – коллинеарной и ортогональной (по отношению к плоскости поляризации излучения лазера). Такое разделение позволяло регистрировать имеющие большой динамический диапазон оптические сигналы взаимно ортогональных поляризаций, поступающие на вход ФПУ (до 50 дБ и более). При ограниченном динамическом диапазоне (обычно до 30 дБ [13]) используемых в лидаре фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) такое техническое решение было оправдано. На рис. 1 показаны только чувствительные тракты ФПУ, на входе которых располагалась оптическая система с диаметром входного зрачка 11, равным 200 мм. Чувствительные тракты использовались для приема слабых сигналов с больших глубин. Грубые тракты (на схеме не указаны), имеющие собственную оптическую систему, располагались рядом с чувствительными трактами на том же расстоянии от шахты излучателя. В грубых трактах использовался входной объек-

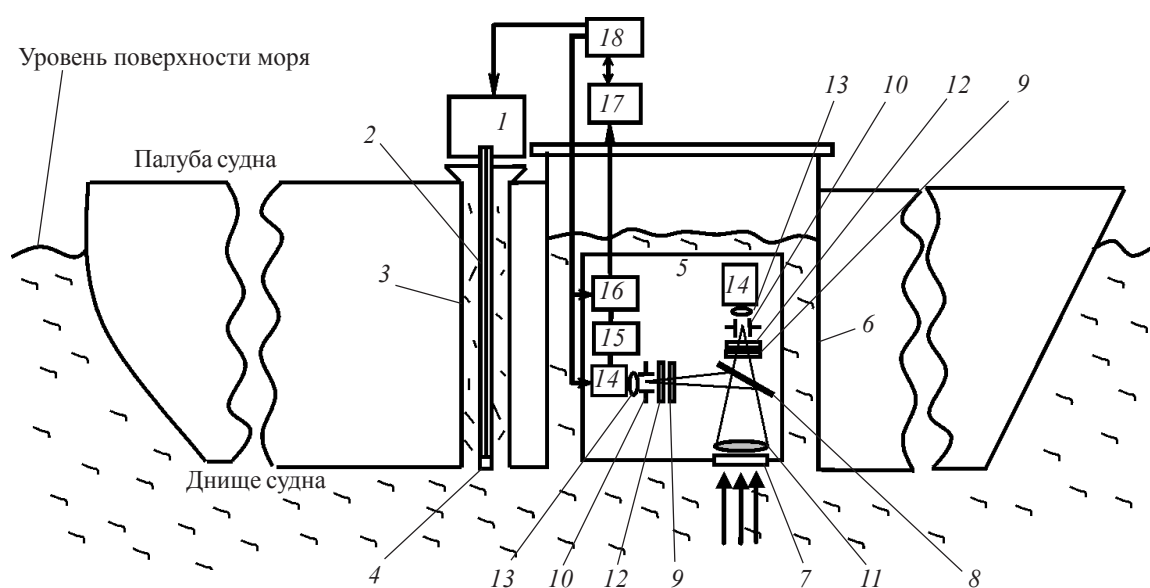


Рис. 1. Структурно-функциональная схема лидара.

тив меньшего диаметра, чем в чувствительных. Сильные сигналы от верхних слоев воды регистрировались в грубых трактах. Разделение сигналов разной поляризации (с учетом положения плоскости поляризации лазерного излучения, заданного конструкцией лазерного излучателя) в группах грубых и чувствительных трактов ФПУ проводилось с помощью поляризационных делительных зеркал 8. Далее в каждом из трактов повышение степени поляризации обеспечивалось соответственным образом настроенными пленочными поляроидами 9. Поле зрения фотоприемных трактов могло регулироваться с помощью ирисовых диафрагм 10, установленных в фокальных плоскостях приемных объективов 11. В трактах ФПУ для отсечки солнечной засветки были установлены интерференционные фильтры 12 на длину волны 0,53 мкм с полосой пропускания 12 нм, которые удовлетворительно работали в сходящихся лучах длиннофокусных объективов 11. Для собиранья света на фотоприемники 14 применялись трехлинзовые коллективы 13.

В качестве фотоприемников в двух грубых и чувствительном ортогональном трактах использовались фотоэлектронные умножители типа ФЭУ187, коэффициент усиления которых был постоянным при выбранном уровне напряжения питания. В чувствительном коллинеарном тракте был применен фотоприемник типа Н7680, коэффициент усиления которого варьировался с помощью встроенной электронной схемы стробирования. Путем стробирования [14] этот ФЭУ открывался с задержкой относительно времени запуска лазерного импульса для приема слабых сигналов рассеяния от слоев воды с глубин ниже 45 м. Меньший динамический диапазон ФЭУ чувствительного ортогонального тракта (по сравнению с чувствительным коллинеарным) позволил обойтись без стробирования. При приеме сигналов от ближних слоев (с глубины от 8 до 14 м) он находился в насыщении, но не глубоком, не вызывающем уменьшения чувствительности при приеме сигналов с большей глубины. Чувствительность трактов ФПУ могла дистанционно устанавливаться с блока управления 18 путем задания значений напряжений питания ФЭУ и размеров полевых диафрагм 10.

Сигналы всех трактов, в которых использовались ФЭУ187, усиливались нелинейными усилителями 15 (на рис. 1 блок усилителя показан только для одного из трактов), характеристика которых была близка к логарифмической. Это позволяло согласовать выходной динамический диапазон фотоприемников с динамическим диапазоном 8-разрядных АЦП 16 (на рис. 1 блок АЦП показан только для одного из трактов). Частота оцифровки аналоговых сигналов каналов ФПУ составляла 500 МГц. Оцифрованные

сигналы по каналам связи передавались на компьютер оператора. Система спутниковой навигации (GPS) обеспечивала ввод в компьютер текущих угловых и географических координат судна с привязкой к системе единого времени. Дистанционное управление аппаратурой лидара осуществлялось с компьютера.

Результаты экспериментальных исследований

Измерения с помощью описанного выше лидара проводились в открытом море с глубинами более 100 м, на судоходном фарватере, а также в мелководном заливе, в который впадает река. Для контроля показателя ослабления водной среды в районе испытаний проводились измерения с помощью погружного фотометрического зонда и белого диска с использованием известных методик [15].

На рис. 2 приведены характерные записи сигналов лидара при движении судна в открытом море в условиях отсутствия какой-либо специфической стратификации оптического показателя ослабления. Приведенные осциллограммы характеризуют зависимость интенсивности обратно рассеянного излучения от времени (глубины) распространения: C_1 – сигнал от грубого коллинеарного тракта, C_2 – от грубого ортогонального тракта, C_3 – от чувствительного коллинеарного тракта и C_4 – от чувствительного ортогонального тракта. По осциллограмме C_4 видно насыщение чувствительного ортогонального тракта в области малых глубин (до 14 м); начальный участок осциллограммы C_3 соответствует отсутствию сигнала до глубины $H \approx 30$ м в стробируемом чувствительном тракте (для удобства наблюдения к сигналу C_3 добавлено постоянное

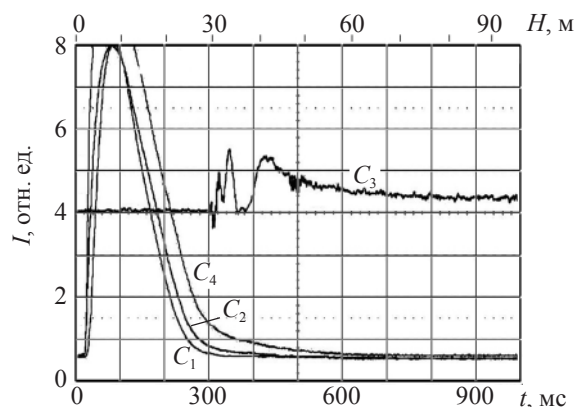


Рис. 2. Сигналы обратного рассеяния от воды в открытом море. (Пояснения см. в тексте.)

смещение уровня). В средней части осциллограммы $C3$ наблюдаются колебания сигнала, обусловленные переходными процессами в электрических цепях управления ФЭУ. Эти колебания носят случайный характер и при обработке сигнала путем усреднения по многим реализациям частично фильтруются. Сигналы от двух грубых трактов несколько различаются по форме. ФЭУ ортогонального тракта (ФЭУ2) с целью повышения чувствительности, путем подбора напряжения питания введен в режим слабого насыщения. ФЭУ коллинеарного канала (ФЭУ1) – не в насыщении.

При выбранных в оптимальном сочетании параметрах лидача (мощности излучения лазера, напряжениях на анодах ФЭУ и размерах диафрагм) сигналы ортогональной и коллинеарной поляризации, полученные от двух грубых трактов, характеризуют слои воды на глубине от 8 до 30 м и мало отличаются друг от друга по интенсивности. Чувствительный ортогональный тракт дает сведения о рассеянии света на глубинах от 14 до 55 м. Чувствительный коллинеарный тракт ($C3$), отличающийся большим усилением примененного в этом канале ФЭУ, характеризует сигнал, получаемый с глубины более 45 м.

На рис. 3 показаны осциллограммы, характеризующие текущие сигналы обратного рассеяния четырех трактов ФПУ в координатах интенсивность–время (глубина), полученные во время исследова-

ний прозрачности воды на судоходном фарватере. Короткий излом на спадающей кривой сигнала говорит о наличии слоя воды с повышенным значением показателя рассеяния света на глубинах от 10 до 15 м. Амплитуда сигнала, полученного вследствие рассеяния лазерного излучения указанным горизонтом, существенно превышает уровень сигналов рассеяния, которые связаны с естественной стратификацией и наблюдались в данном районе моря вне фарватера (см. рис. 2). Возможной причиной столь существенного скачка показателя рассеяния является рассеяние на примесях различного типа, загрязняющих воду, и на пузырьках растворенных газов. Концентрация загрязняющих примесей и газов на разных горизонтах различна и зависит от интенсивности движения судов, метеоусловий и приливных течений в данном районе. При этом, как известно, подвижность пузырьков газов с диаметром порядка 1 мкм низка и они практически самостоятельно не всплывают, однако они существенно (в несколько раз) могут изменить амплитуду сигналов обратного рассеяния [12].

Отличие в масштабе осциллограмм, представленных на рис. 2 и 3, связано с различием методов их регистрации: на рис. 2 сигналы сфотографированы с экрана компьютера, на рис. 3 – сигналы переданы непосредственно в печать от компьютера.

На рис. 4 приведена запись сигналов обратного рассеяния одного из трактов ФПУ (грубого ортого-

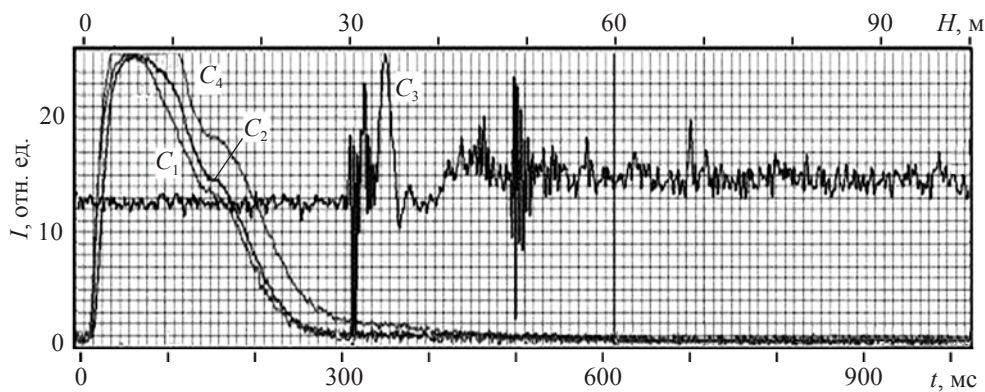


Рис. 3. Сигналы обратного рассеяния на фарватере.

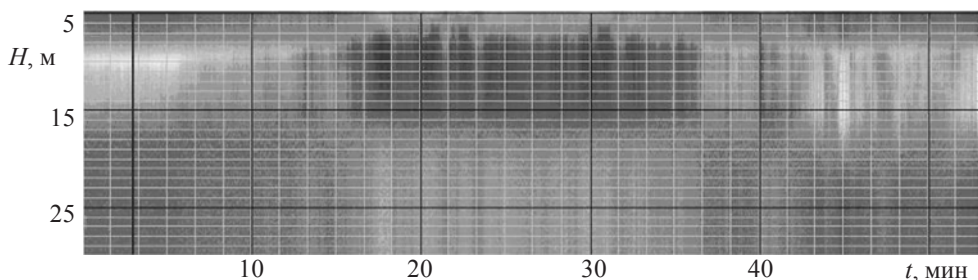


Рис. 4. Временная изменчивость сигналов обратного рассеяния.

нального – ФЭУ2) в координатах интенсивность– время (глубина)–дистанция по ходу движения судна в виде тоновой картины. Время хода на галсе – 50 мин. Светлому тону соответствует высокий уровень сигнала. По картине можно выделить слой воды в толще до 30 м с высокой степенью неоднородности оптических характеристик. В средней части галса на глубине 15–25 м просматривается светорассеивающий слой воды, что хорошо согласуется с предположением о формировании аэрированного слоя на мелководье во время прилива (направление приливного течения во время эксперимента совпадало с направлением движения судна). Для выявления незначительных неоднородностей оптических параметров водной среды из принятого ФПУ сигнала вычитался сигнал, полученный усреднением сигналов по ходу движения судна за

время хода на галсе. При обработке всего массива данных, полученных при проходе судном намеченной траектории, учитывались уровень шумов приемной аппаратуры, а также конкретные значения параметров лидара, контролируемые в ходе всего эксперимента.

Пример записи сигналов обратного рассеяния при движении судна в мелководном заливе, воды которого имеют примесь мутных выносов впадающей в него реки, приведен на рис. 5. Тоновая картина на сигналах, записанных в указанной акватории на галсе длиной 1000 м, представлена на рис. 6.

Несколько небольших изломов на спадающем участке осциллограмм (рис. 5) и неоднородности в верхней части картины (рис. 6) связаны с распределением мутных слоев воды. На осциллограммах хорошо проявляются пики на глубине около 30 м,

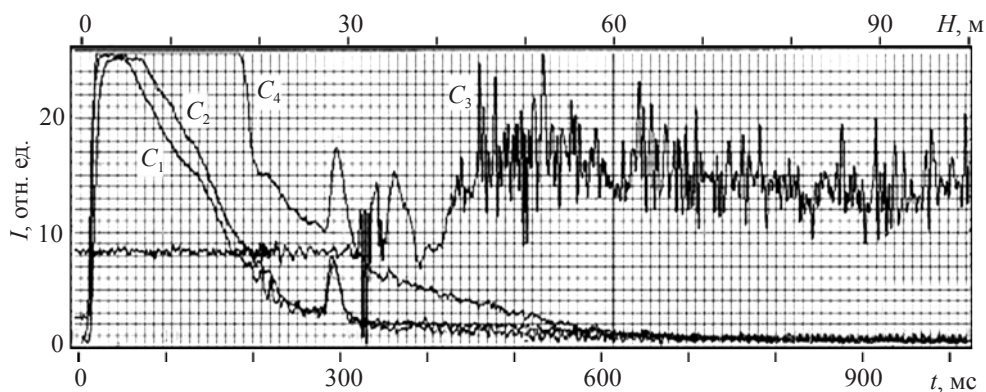


Рис. 5. Сигнал обратного рассеяния в мелководном заливе.

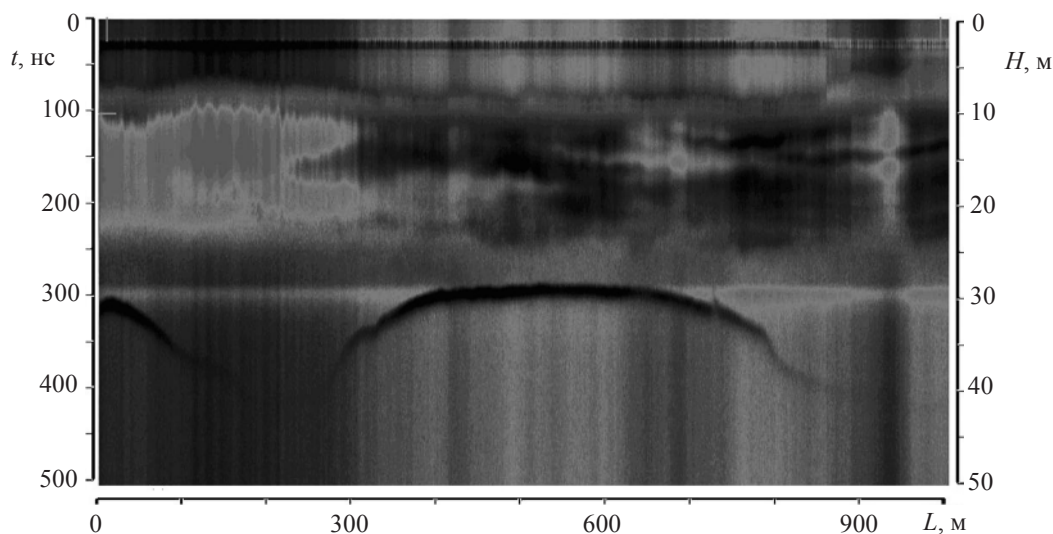


Рис. 6. Тоновая картина сигналов, полученных от ортогонального чувствительного канала в устье реки, впадающей в морской залив.

соответствующие отражению от дна. Отражению зондирующего излучения от дна соответствует также четкая линия в нижней части картины на рис. 6.

На рис. 7 показан пример сигнала обратного рассеяния в координатах интенсивность–время (глубина) с отметкой отражения от дна на глубине 50 м в другом месте залива.

При обработке осциллограмм проводилась оценка показателя ослабления по спаду сигнала в грубом коллинеарном тракте с учетом характеристик лидара и сравнение с данными от погружного фотометрического зонда и белого диска. При нахождении показателя ослабления по спаду кривой сигнала обратного рассеяния использовалось выраже-

ние $P_{\text{сop}} \sim \frac{e^{-2(1-\Lambda)\varepsilon Z}}{Z^3}$, где $P_{\text{сop}}$ – мощность сигнала об-

ратного рассеяния, Z – дистанция, $\Lambda \approx 0,25-0,5$ – вероятность выживания фотона, ε – показатель ослабления. Расчетная оценка ε ($\varepsilon \approx 0,4-0,6 \text{ м}^{-1}$) хорошо совпадала с измерениями на станциях, проведенными по известным методикам с помощью белого диска и погружного измерителя показателя ослабления в открытом море в период проведения работ ($\varepsilon \approx 0,6 \text{ м}^{-1}$).

Заметного отличия сигналов ортогональных и коллинеарных трактов ФПУ по интенсивности в ходе настоящих экспериментов не выявлено, поэтому дополнительная обработка сигналов обратного рассеяния (СОР) по алгоритмам сравнения СОР различной поляризации не проводилась. Дальнейшие исследования в этом направлении позволят уточнить диапазон глубин, при которых наиболее ярко могут проявиться преимущества поляризационного алгоритма обработки сигналов лидара.

Проверка разрешающей способности лидара по глубине проводилась по измерению ширины отмет-

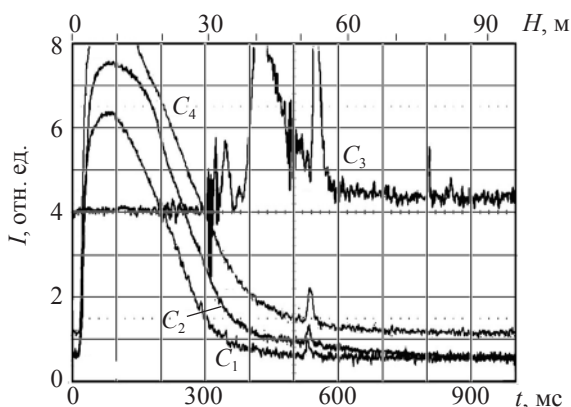


Рис. 7. Сигнал обратного рассеяния с отметкой отражения от дна на глубине около 50 м.

ки на осциллограмме СОР, полученных от белого диска. Измеренное значение составило 2 м.

Исследования оптических характеристик поверхностного слоя моря проводились при волнении моря до 3 баллов. При усилении ветра наблюдалось увеличение амплитуды СОР, что обусловлено притоком на глубину центров рассеяния (пузырьков воздуха и слоев мутности с поверхности моря).

Заключение

Таким образом, проведенные натурные исследования разработанного лидара подтвердили возможность его применения для изучения характеристик верхних слоев моря, а также в целях решения задач батиметрии и экологии.

Показана принципиальная возможность выявления слоев мутности и слоев моря, насыщенных пузырьками воздуха. Этот метод может быть эффективным методом контроля в ряду мероприятий по обеспечению экологической и технологической безопасности мест добычи, транспортировки и переработки углеводородов. Нефтяные пленки, появление которых вполне вероятно при производстве работ на морском шельфе, могут препятствовать газовому обмену системы океан–атмосфера, существенно обеднять аэрацию верхних слоев океана и изменять их оптические свойства. Регистрация таких изменений может проводиться весьма эффективно судовыми лидарами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гольдин Ю.А., Лучинин А.Г. Авиационные лидарные методы исследования вертикальной структуры оптических характеристик верхнего слоя океана // Приповерхностный слой океана. Физические процессы и дистанционное зондирование / Под ред. Полиновского Е.Н., Таланова В.И. Н. Новгород: ИПФ РАН. 1999. Т. 2. С. 225–444.
2. Браво-Животовский Д.М., Долин Л.С., Савельев В.А., Фадеев В.В., Щегольков Ю.Б. Оптические методы диагностики океана. Лазерное дистанционное зондирование // Дистанционные методы исследования океана. Горький: ИПФ АН СССР, 1987. С. 84–125.
3. Букин О.А., Ильичев В.И., Майор А.Ю. и др. Судовой гидролидарный комплекс для зондирования верхнего слоя океана // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 10. С. 1403–1409.
4. Эмдин В.С. Сравнительный анализ локального и дистанционного оптических методов зондирования морской среды // Оптический журнал. 2001. Т. 68. № 3. С. 36–42.
5. Penne M.F., Abbot R.H., Phillips D.M. et al. Airborne Laser Hydrography in Australia // Appl. Opt. 1986. V. 25. № 13. P. 2046–2058.

6. *Churnside J.H., Wilson J.J., Tatarskii V.V.* Lidar profiles of fish schools // *Appl. Opt.* 1997. V. 36. № 24. P. 6011–6022.
 7. *Алешин И.В.* Оптические методы и средства оперативного контроля экологического состояния морской среды // *Оптический журнал.* 2001. Т. 68. №4. С.27–36.
 8. *Feygels V.I., Kopilevich Yu.I.* Russian Airborne LIDARs for Oceanography // *Proc. SPIE.* 1999. V. 3761. P. 127–141.
 9. *Васильков А.П., Гольдин Ю.А., Гуреев Б.А.* Определение вертикального распределения показателя рассеяния света морской воды с помощью авиационного поляризационного лидара // *Изв. РАН. ФАО.* 1997. Т. 33. № 4. С. 563–569.
 10. *Feigels V.I., Kopilevich Yu.I.* Remote Sensing Subsurface Layers of Turbid Sea Water with the Help of Optical Lidar System // *Proc. SPIE.* 1993. V. 2048. P. 342–353.
 11. *Smart J.H., Know K.H.* Comparisons Between in Situ and Remote Sensing Estimates of Diffuse Attenuation Profiles // *Proc. SPIE.* 1996. V. 2964. P. 100–109.
 12. *Коханенко Г.П., Крекова М.М., Пеннер И.Э., Шаманев В.С.* Обнаружение неоднородностей гидрозоля поляризационным лидаром // *Оптика атмосферы и океана.* 2004. Т. 17. № 9. С. 750–758.
 13. *Киес Р.Дж., Крузе П.В., Патли Э.Г. и др.* Фотоприемники видимого и ИК диапазонов Пер. с англ. / Под ред. Киеса Р.Дж. М.: Радио и связь, 1985. 328 с.
 14. *Молебный В.В.* Оптико-локационные системы (основы функционального построения). М.: Машиностроение, 1981. 185 с.
 15. *Иванов А.П.* Физические основы гидрооптики. Минск: Наука и техника, 1975. 390 с.
-