

**О.А. Букин, В.И. Ильичёв, А.Ю. Майор, А.Н. Павлов,  
А.Г. Стафиевский, В.А. Тяпкин**

## **СУДОВОЙ ГИДРОЛИДАРНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЗОНДИРОВАНИЯ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ОКЕАНА**

Приводится описание гидролидарного комплекса, установленного в гидрооптической шахте научно-исследовательского судна. Конструкция лидара исключает влияние морской поверхности на результаты зондирования верхнего слоя океана и позволяет проводить измерения на ходу судна. Описаны результаты измерения пространственно-временной структуры коэффициента ослабления лазерного излучения в верхнем слое океана.

В большинстве работ, посвященных лазерному зондированию верхнего слоя океана (ВСО), приводятся результаты измерения параметров самой поверхности или характеристик ВСО, измеренных через морскую поверхность. Основное преимущество зондирования через поверхность состоит в возможности проведения измерений на больших акваториях за короткий промежуток времени (при установке лидара, например, на авианосителе), что необходимо при исследовании крупномасштабных образований в океане или при проведении поисковых работ. В этом случае появляются ограничения на использование метода, связанные с влиянием состояния морской поверхности на результаты зондирования.

Это влияние проявляется: во-первых, в увеличении дисперсии интенсивности сигнала обратного рассеяния, пришедшего из-под поверхности, во-вторых, в наличии сильного отраженного сигнала от границы раздела (блика). Увеличение дисперсии сигнала обратного рассеяния приводит к <маскировке> изменений сигнала, вызванных модуляцией глубинного распределения коэффициента ослабления лазерного излучения  $e(h)$  гидрофизической структурой, наличием биомассы или динамическими процессами в ВСО и, как следствие, к потере чувствительности метода. Влияние блика состоит в появлении значительных послеимпульсов на регистрирующих ФЭУ, которые заметно уменьшают глубину зондирования и приводят к искажению формы сигнала обратного рассеяния [1]. Разработанные нами судовые лидарные системы позволили в натурных экспериментах определить возможности метода лазерного зондирования при работе через морскую поверхность [1, 2, 3]. Так, в отсутствие на поверхности мелкомасштабной ветровой ряби удавалось проводить регистрацию внутренних волн амплитудой в несколько метров. Кроме этого, регистрировались такие процессы, как опускание биомассы в утренние часы, которые также значительно модулировали глубинное распределение  $e(h)$ . Более <тонкие> процессы, такие как стратификация  $e(h)$ , связанная с глубинным распределением гидрофизических параметров, внутренние волны порядка одного метра, нам регистрировать не удавалось.

Эксперименты, проведенные с использованием погружных иллюминаторов, исключили влияние состояния морской поверхности на результаты зондирования и позволили наблюдать пространственно-временные структуры  $e(h, t)$ , вызванные распределением гидрофизических параметров по глубине, а также регистрировать внутренние волны малой амплитуды [4]. Использование схем зондирования с погружными иллюминаторами возможно только в дрейфе судна или на очень малом ходу, что значительно ограничивает время проведения работ в экспедиции. В связи с этим был разработан и смонтирован в гидрооптической шахте научно-исследовательского судна <Академик Лаврентьев> гидролидар, обеспечивающий проведение лазерного зондирования ВСО по ходу судна. Блок-схема гидролидара приведена на рис. 1.

Оптическая система заводки и регистрации излучения реализована в виде телескопической системы труб с иллюминатором в нижней части. Внутри труб большого диаметра проходит тракт зондирующего импульса. Такая система позволяет экранировать приемную часть от

зондирующего излучения лазера и бликовой засветки от иллюминаторного стекла. Лазерный импульс (излучатель 1) через поворотное зеркало 3 и иллюминатор 4 заводится в воду, рассеянное обратное излучение собирается приемным устройством 2. Сигналы с фотоумножителей 6 поступают на предусилители, а затем в блок обработки сигнала, выполненный в стандарте САМАС. Обработанный сигнал в цифровой форме вводится в ЭВМ, где производится восстановление глубинного профиля  $e(h)$ . Информация о пространственно-временной структуре  $e(h)$  в реальном времени выводится на цветной графический монитор. Ниже приведены основные параметры гидролидара.

Длина волны излучения .....	532 нм
Энергия в импульсе .....	180 мДж
Длительность импульса .....	10 нс
Частота посылок лазерных импульсов .....	до 12 Гц
Диаметр приемного объектива .....	300 мм
Число регистрирующих каналов (ФЭУ-79) .....	2
Минимальное разрешение по глубине.....	1,2 м

Использование двух каналов регистрации сигнала обратного рассеяния позволяет согласовать динамические диапазоны приемных ФЭУ и сигнала путем регистрации сигнала на каждом ФЭУ с определенного глубинного интервала. Это достигается при помощи установки специальных диафрагм на фотокатоды и управлением чувствительности ФЭУ. На стадии обработки сигнала и восстановления глубинного профиля  $e(h)$  осуществлялась сшивка результатов измерения в каждом канале.

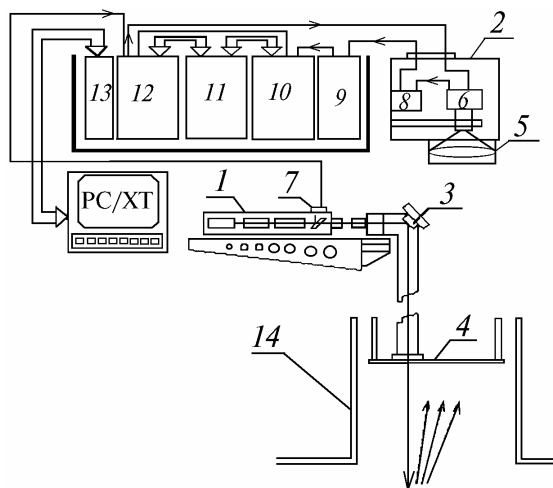


Рис. 1. Блок-схема лидара в гидрооптической шахте судна: 1 – излучатель лидара; 2 – приемная часть лидара; 3 – поворотное зеркало; 4 – иллюминатор; 5 – приемный объектив; 6 – фотоумножители; 7 – фотодиод; 8 – предусилители; 9 – усилитель; 10, 11 – АЦП; 12 – блок управления электронной частью лидара; 13 – блок связи с ЭВМ; 14 – корпус гидрооптической шахты

Конструкция гидролидара обеспечивала проведение измерений пространственно-временной структуры  $e(h)$  как в дрейфе, так и по ходу судна (максимальная скорость судна, при которой не происходило образование турбулентных потоков на выходном иллюминаторе, составила порядка 12 узлов). Вхождение зондирующего импульса в поле зрения приемного объектива начиналось с 4-х метров от иллюминатора, импульс полностью входил в поле зрения на глубине 10 м. При работе по ходу судна частота посылок лазерных импульсов не превышала 1 Гц, для восстановления глубинного профиля использовалось различное накопление сигнала, на максимальных глубинах накопление проводилось по 10 импульсам.

Для расчета глубинного профиля  $e(h)$  использовался метод малоуглового приближения, который применялся вплоть до глубин порядка 80 м. Для расчета профиля  $e(h)$  до глубин порядка 30 м мы использовали и метод Монте-Карло, который в диапазоне указанных глубин дал структуру  $e(h, t)$ , совпадающую качественно с пространственно-временным распределением, восстановленным с помощью малоуглового приближения. Значения коэффициента ослаб-

ления лазерного излучения выводились на экран с помощью восьми цветов. Таким образом, непрерывное распределение по глубине  $e(h)$  представлялось в виде слоистой структуры.

На рис. 2, *а, б, в* показано пространственно-временное распределение  $e(h, t)$  для различных гидрологических ситуаций. По горизонтальной оси отложено время (на всех трех рисунках порядка одного часа), по вертикальной оси – глубина (от 10 до 50 м). Для распределений  $e(h, t)$ , приведенных на рис. 2, *а, б, в* по данным гидрологических измерений, был выявлен сезонный термоклин в диапазоне зондируемых глубин с различным градиентом температуры по глубине.

На рис.2, *а* границы термоклина находились на глубинах 15 и 24 м. Для распределений  $e(h, t)$ , приведенных на рис. 2, *б, в*, верхняя и нижняя границы термоклина находились на глубинах 17 – 40 и 12 – 50 м соответственно. Абсолютные изменения температуры на слое скачка были во всех трех случаях примерно одинаковы, рисунки 2, *а, б, в* расположены в порядке уменьшения значения градиента температуры.

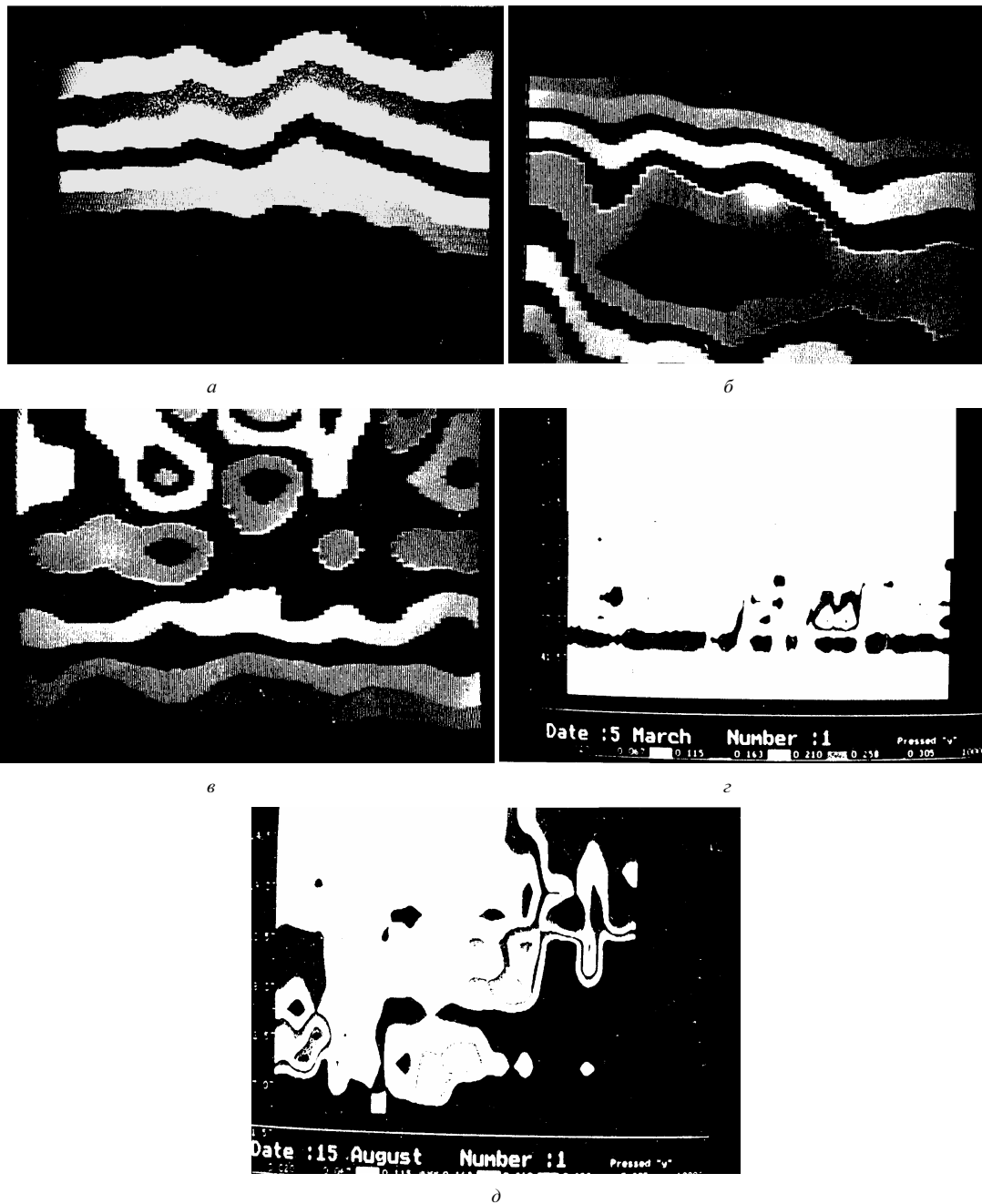


Рис. 2. Пространственно-временное распределение  $e(h, t)$  для различных гидрологических ситуаций

Для случая малой величины градиента температуры (рис. 2, в) в нижней части термоклина наблюдались образования типа <линз> прозрачности (области с низкими значениями коэффициента ослабления лазерного излучения – светлые области в нижней части рисунка 2, в) и <линз> с большими значениями  $e(h)$  (темные области в нижней части рис. 2, в). По-видимому, эти <линзы> связаны с термохалинной структурой морской воды на этих глубинах.

Необходимо отметить, что интерпретация приведенных выше распределений относится к конкретным гидрологическим ситуациям. Однако сравнительный анализ данных зондирования ВСО, полученных на протяжении двух экспедиций в 1989 – 1990 гг., с данными гидрологического зондирования показал, что слои с большими значениями  $e(h)$  регистрируются в пределах значений глубин, на которых был выявлен термоклин. Величины градиентов температур в границах термоклинов хорошо коррелировали со значениями градиентов  $e(h)$ , полученными из данных лидарного зондирования.

На рис. 2, г приведено изображение слоя активной биомассы, полученное с помощью лазерного зондирования по ходу судна. Глубина расположения слоя порядка 40 м, по горизонтальной оси – расстояние порядка 3 миль, по вертикальной – диапазон глубин от 20 до 45 м. Идентификация данного слоя как биомассы проводилась по процессу опускания биологического вещества в утренние часы с поверхности на глубину.

Рисунок 2, д иллюстрирует возможности гидролидарной системы при работе на длинных разрезах. По вертикальной оси отложен диапазон глубин 10 – 40 м, по горизонтальной оси расстояние, пройденное судном на разрезе – около 2000 миль. Измерения проводились непрерывно начиная с 20.00 до 07.00 ч утра следующих суток по местному времени. Корпус судна частично экранировал солнечный фон, что позволило проводить зондирование в вечернее и утреннее время до глубины 40 м. Данные, полученные за предыдущие сутки, <сшивались> с результатами последующих измерений, и, таким образом, получалась непрерывная картина пространственно-временного распределения.

Результаты, приведенные выше, иллюстрируют возможности судовой гидролидарной системы. Даже предварительный анализ результатов показывает, что восстановленная таким образом пространственно-временная структура  $e(h, t)$  может быть использована для исследования процессов, протекающих в ВСО – течений, фронтальных зон, внутренних волн и т. д. Предельная глубина восстановления  $e(h, t)$  составила величину порядка 80 м, глубина ограничена отсутствием надежных алгоритмов расчета коэффициента ослабления лазерного излучения для таких оптических толщин.

Работа гидролидарного комплекса и способ отображения полученной информации во многом аналогичны наблюдаемому в акустических системах зондирования. В связи с этим во многом облегчается проведение корреляционного анализа данных, полученных при одновременном зондировании в оптическом и акустическом диапазонах. Проведение подобных работ может в значительной степени снять ту неопределенность, которая существует при идентификации процессов, происходящих в ВСО.

В заключение авторы выражают благодарность С. А. Харченко за проведение конструкторских работ гидролидарной системы.

1. Букин О.А., Киселев В.Д., Кленин С.А. и др. Комплексное оптоакустическое зондирование верхнего слоя океана. Владивосток: ТОИ ДВО АН СССР, 1988. 18 с. Деп. в ВИНТИ. N 8118 – В88.

2. Ильичёв В.И., Букин О.А., Лысун В.Н. и др. // ДАН СССР. 1988. Т. 303. N 6. С. 1482 – 1485.

3. Ильичев В.И., Букин О.А., Лысун В.Н. и др. // Тихоокеанский ежегодник. Владивосток. 1988. С. 185–190.

4. Букин О.А., Ильичев В.И., Критский И.А., Павлов А.Н. // ДАН СССР. 1990. Т. 312. N 4. С. 972 – 973.

Тихоокеанский океанологический институт, ДВО РАН, Владивосток

Поступила в редакцию  
6 апреля 1994 г.

O. A. B u k i n, V. I. I l' i c h e v, A. J u. M a i o r, A. N. P a v l o v, A. G. S t a f i e v s k i i, V. A. T y a r k i n. **Shipborne Hydrolidar Setup for Sounding the Ocean's Upper Layer.**

Description of the hydrolidar setup located inside hydrooptical trunk of a research ship is presented. The construction of the lidar eliminates the influence of sea surface on the results of the oceans upper layer sounding and enables measuring while running. The measurement results are presented of the spatial – temporal structure of the laser radiation extinction coefficient inside the ocean's upper layer.