

Теневая диафрагма в гидрооптическом лидаре

В.С. Шаманаев, И.Э. Пеннер, М.М. Крекова*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 24.10.2008 г.

Проведены эксперименты по зондированию морского дна на мелководье самолетным лидаром. Для уменьшения бликовой составляющей эхосигнала от поверхности морской воды в приемном телескопе лидара аксиальная часть поля зрения экранировалась с помощью теневой диафрагмы. Таким образом, весь принимаемый сигнал от водной толщи формируется только многократным рассеянием. Такая схема зондирования улучшает контрастность сигналов от дна моря. Методом Монте-Карло была промоделирована работа лидара с теневой диафрагмой поля зрения. Показано, что использование теневой диафрагмы в гидрооптическом самолетном лидаре является эффективным методом повышения контрастности эхосигналов от дна. Из неаксиальных подводных эхосигналов лидара, содержащих только многократное рассеяние, методом логарифмической производной были восстановлены «эффективные» показатели ослабления излучения водой. Эти параметры в силу влияния многократного рассеяния зависят от угла поля зрения приемника лидара, однако в любом случае имеют физически достоверные значения.

Ключевые слова: лидар, гидрооптика, индикатриса рассеяния.

Введение

При лазерном зондировании моря с борта самолета за счет отражения луча от микроплощадок волнения возникает бликовая засветка фотодетекторов. Она является источником целого ряда явлений, ограничивающих эффективность гидрооптического зондирования.

Во-первых, это уменьшение рабочего динамического диапазона всей системы регистрации, так как к сигналу обратного рассеяния от гидрозолей и молекул воды добавляется очень мощный френелевский, почти зеркальный компонент. Информации для наших задач он не несет, а принимаемый сигнал ограничивает сверху по динамическому диапазону.

Во-вторых, это импульсы последствия фотомножителей (изначально присущий ФЭУ один из видов дробовых шумов), дающие при обработке ложные подводные сигналы [1]. Отметим, что даже использование поляризации путем «отрезания» какой-либо составляющей полного сигнала не эффективно (деполяризация эхосигнала на микроплощадках волнения весьма значительна) и фотодетекторы все равно перегружаются.

Наиболее радикальным методом защиты детекторов было бы использование быстродействующего оптического затвора перед фотокатодами ФЭУ, чтобы закрыть их на время существования мощной френелевской части сигнала, т.е. фактически на время

длительности лазерного импульса. Но технически это до сих пор не реализовано. Электронное запирающее катодной камеры фотоумножителя слабо, так как электронное облако, создавшееся в этой камере, впоследствии относительно долго рассасывается (десятки наносекунд) и поэтому ухудшается реальное быстродействие системы регистрации лидара [2]. В связи с этим полноценного запирающего всего фотоприемного тракта не происходит.

Нами был использован следующий простой метод, который поясняет рис. 1, — затенение бликующего френелевского пятна от поверхности воды в плоскости изображения приемного телескопа лидара.

Теневые методы в оптических исследованиях используются давно. В классических схемах экранируется от приемника источник прямого излучения. Это лабораторные теневые приборы на оптической скамье, солнечные телескопы — коронографы и т.п. Такой подход был использован и для лидара. Например, американский патент [3], описывающий пространственный фильтр в фокальной плоскости рабочей диаграммы лидара (по сути — та же теневая диаграмма), имеет приоритет от 1970 г.

Из рис. 1 видно, что непрозрачное пятно 5 экранирует освещенную прямым лучом лазера поверхность воды, т.е. оно является теневой диаграммой. Сигнал, содержащийся в заштрихованной части поля зрения, равной расходимости луча лазера, отсекается. Здесь содержатся все однократно рассеянное зондируемым объектом излучение и часть многократного. Остальная, кольцевая, часть поля зрения содержит только многократно рассеянные фотоны, которые, однако, тоже могут нести информацию.

* Виталий Сергеевич Шаманаев (shvs@iao.ru); Иоганес Эрнстович Пеннер (penner@iao.ru); Маргарита Матвеевна Крекова (mmk@iao.ru).

На практике для создания такой рабочей диаграммы лидара в плоскости изображения приемного телескопа помещалось тонкое стекло, и на него в центре полной диафрагмы 4 черной краской наносилась точка. Ее диаметр несколько превышал диаметр изображения освещенной площадки 2 на поверхности моря, чтобы скомпенсировать погрешности юстировки лидара. Юстировка заключалась в следующем. Лидар наводился на плоскую мишень, находящуюся на удалении, приблизительно равном обычной высоте полета (200–300 м). Наблюдая за пятном излучения лазера на мишени по его изображению в плоскости диафрагмы 4, оператор лидара подвижками лазера смещал изображение лазерного пятна под теньевую диафрагму 5.

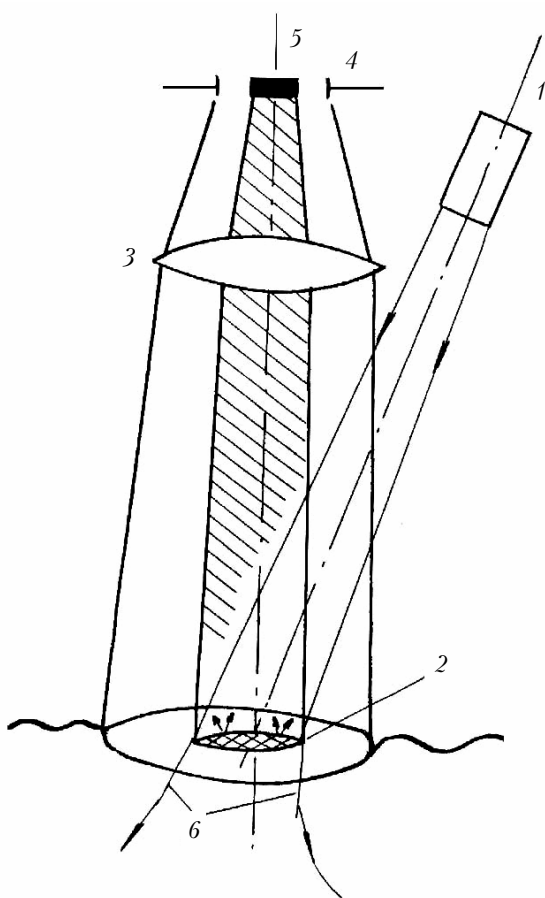


Рис. 1. Принцип работы теневого диафрагмы в лидаре: 1 – лазер; 2 – пятно излучения лазера на воде; 3 – входная линза телескопа; 4 – диафрагма поля зрения в плоскости изображения; 5 – непрозрачное пятно внутри диафрагмы; 6 – отклоненные и рассеянные гидрозолями лучи в воде

Таким образом, идеология всей процедуры удаления аксиальной составляющей сигнала проста и ясна. Однако возникает вопрос о возможности одновременного извлечения информации о показателе ослабления (рассеяния) излучения в воде. Например, в задаче батиметрии такие данные являются важными: показатель рассеяния излучения в воде через процесс

многократного рассеяния света приводит к систематическому смещению во времени импульса, отраженного от морского дна [4], т.е. к искажению измеренной глубины дна. Возникает вопрос: можно ли в случае применения теневого диафрагмы (ТД) использовать неаксиальную часть принимаемого эхосигнала для оценки мутности зондируемой водной толщи, т.е. для решения канонической обратной задачи лазерного зондирования?

Рассмотрим на первом этапе уже имеющиеся экспериментальные данные. Наши полеты выполнялись на самолете ИЛ-18ДОРР с лидаром «Макрель-2» над мелководьем Каспийского моря. Для анализа поляризации использовался 2-канальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с шагом квантования 25 нс и разрядностью 6. Район полетов – Туркменский залив, приблизительно 120 км к югу от г. Красноводска (ныне г. Туркменбаши), вдоль параллели от побережья до о-ва Огурчинский. Объект наблюдения представлял собой относительно ровное песчаное дно на глубине 10–15 м, хорошо наблюдаемое визуально, так как прозрачность воды была достаточно высокая. Длина маршрута достигала 70 км, высота полета – 200 м. Два пролета выполнялись по одному маршруту, но в разных направлениях: к острову от берега и наоборот.

На рис. 2 представлена последовательность эхосигналов при традиционном методе зондирования в полном угле поля зрения 13 мрад. Они получены с частотой следования 1 Гц при скорости полета 90 м/с (320 км/ч).

Рис. 3 иллюстрирует такую же ситуацию, но теньевая диафрагма уже введена в поле зрения. Она экранирует аксиальную часть поля зрения приемного телескопа с раскрывом 3 мрад, что несколько больше угла расходимости лазерного луча. Наружная часть полного угла поля зрения осталась прежней, т.е. 13 мрад.

Заметим, что данный эксперимент не являлся именно батиметрическим, так как параметры системы регистрации не позволяли реализовать требуемые погрешности дальнометрирования. Да и контрольные (прямые) измерения глубины дна не проводились. (Например, по стандарту Австралии среднеквадратическая погрешность измерения глубины дна на мелководье не должна превышать 0,35 м. Сюда входит учет и взволнованной поверхности моря, и приливно-отливных явлений [4].)

Основное внимание уделялось проверке реального использования идеи теневого диафрагмы в нашем лидаре и возможности расширения ее физической применимости.

Тем не менее для подобных последовательностей сигналов была вычислена контрастность импульсов именно от дна: $K = F_{\text{имп}}/F_{\text{ап}}$, где $F_{\text{имп}}$ – амплитуда подводного импульса от дна; $F_{\text{ап}}$ – амплитуда аппроксимирующего водного сигнала в этом же месте, но в отсутствие донного импульса. Анализировались как параллельная, так и перпендикулярная составляющие сигнала.

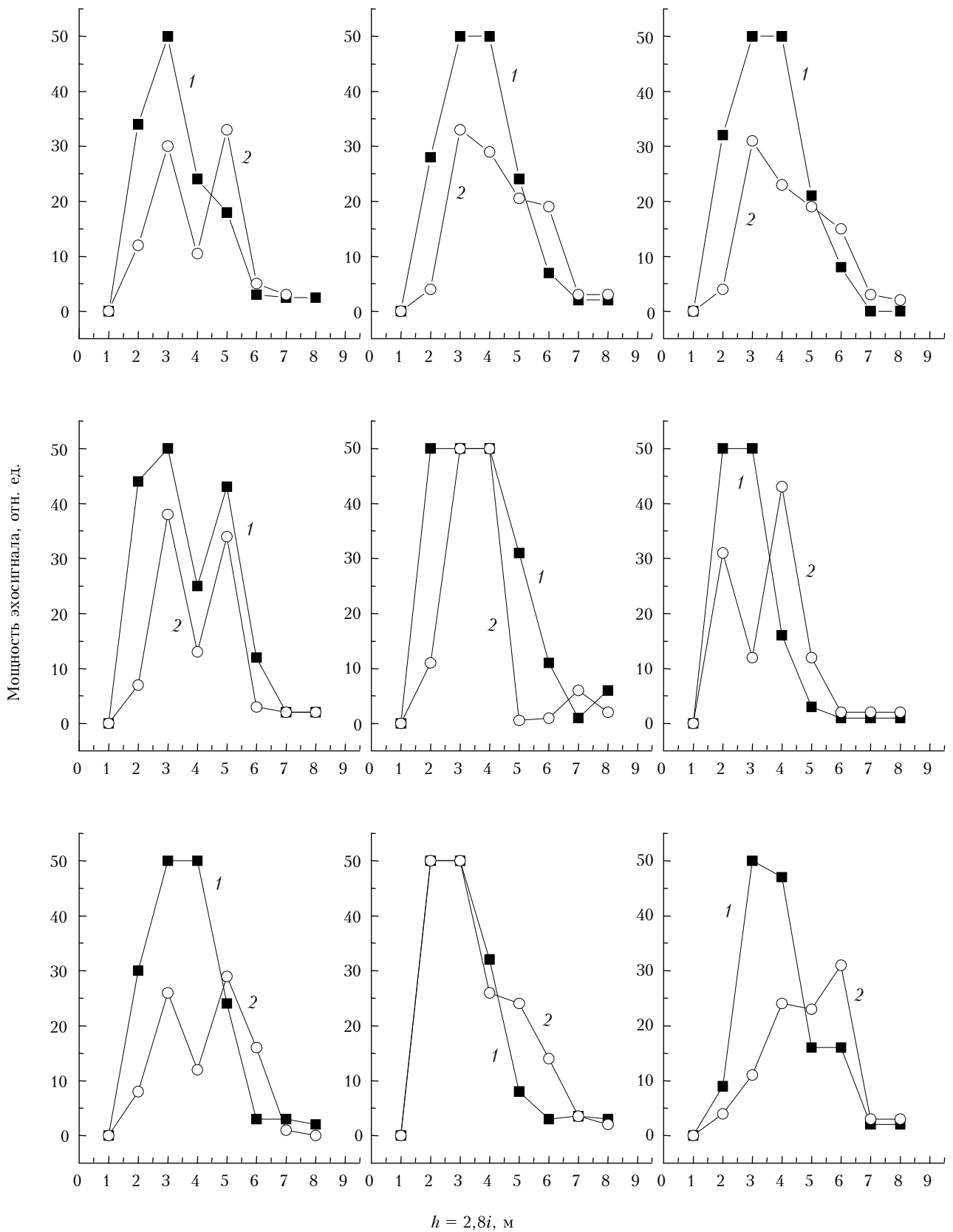


Рис. 2. Последовательность типовых экспериментальных эхосигналов от песчаного дна. Полный угол поля зрения лидара 13 мрад, скорость полета 90 м/с, частота вспышек 1 Гц: 1 – поляризованный; 2 – деполаризованный компоненты сигнала. По оси абсцисс – глубина под водой с шагом 2,8 м, т.е. $h = 2,8i$ (i – номер отсчета)

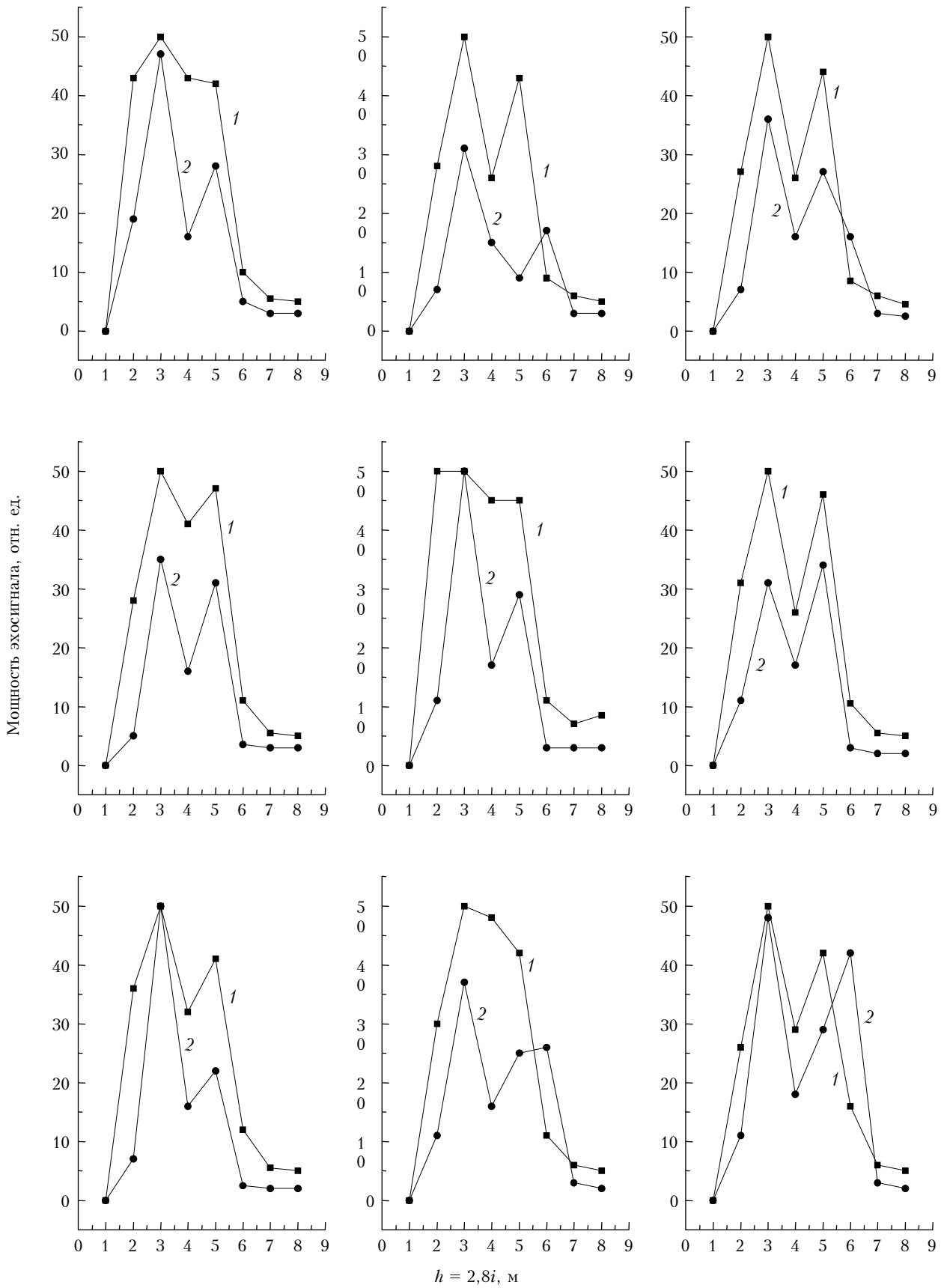


Рис. 3. Последовательность экспериментальных эхосигналов от дна при введенной теневой диафрагме, отсекающей аксиальное поле зрения 3 мрад. Обозначения см. рис. 2

В табл. 1 сведены полученные данные по контрастам K_{\perp} и K_{\parallel} для обеих составляющих.

Таблица 1

Контрастность эхосигнала от морского дна для различных условий натурального эксперимента

Параметр	Теневая диафрагма отсутствует		Теневая диафрагма введена	
	Сигнал			
	поляризованный	деполяризованный	поляризованный	деполяризованный
Средняя контрастность \bar{K}	1,5	4,0	2,5	3,9
Среднеквадратическое отклонение σ_k	0,9	2,4	0,6	1,8
Разброс контраста σ_k/\bar{K} , %	60	60	24	46
Повторяемость случаев при $\bar{K} > 2$, %	22	68	78	89

Какого-то революционного улучшения ситуации по контрасту не произошло, но тем не менее налицо прогресс. Из рис. 1, 2 и табл. 1 видно, что контрасты для обеих составляющих сигналов улучшились. При наличии ТД измерения стали стабильнее, так как флуктуации значений контраста (σ_k/K) уменьшились от 60 до 46% и даже до 24% для поляризованного сигнала. Но самой, пожалуй, интересной является нижняя строка табл. 1. В ней указана относительная частота появления сигналов, у которых значения контрастности больше двух. Для деполяризованного сигнала K_{\perp} возросло с использованием ТД примерно от 60 до 80%, а для поляризованного компонента K_{\parallel} возросло в разы: от 20 до почти 80%. То есть обнаружение дна становится статистически более обеспеченным по обоим каналам. Дело в том, что в иностранных разработках лидаров для таких целей предпочитают использовать только один канал, а именно деполяризационный. Это несколько проще технически и менее затратно с финансовой точки зрения. С другой стороны, усложняется задача интерпретации данных, распознавания природных нефелоидных слоев, полей водорослей и иных светорассеивающих структур, которые могут замаскировать собственно дно.

Однако ранее было показано, в том числе и нами [6], что использование поляризационных параметров (абсолютные значения деполяризации, скорости их измерения, временные задержки между компонентами) является весьма полезным для количественного распознавания некоторых типов подводных светорассеивающих образований. Именно поэтому даже в задаче батиметрии необходимо применять оба поляризационных компонента эхосигнала при линейной поляризации зондирующего импульса.

Как уже отмечалось выше, знание показателя ослабления (точнее, рассеяния) позволяет оценить и скомпенсировать возникающее из-за многократно-

го рассеяния (МКР) систематическое смещение измеряемой глубины. (Физический процесс этого явления в данной статье не рассматривается.) При этом необходимо ответить на несколько вопросов: 1) насколько значение показателя ослабления ϵ , полученное из сигнала от кольцевого поля зрения, отличается от истинного значения и от восстановленного в условиях полного поля зрения; 2) какие значения ϵ , т.е. вычисленные из того или иного кольцевого поляризации компонента, лучше соответствуют реальности. Ведь оба они содержат только многократно рассеянный эхосигнал.

Поэтому методом Монте-Карло были рассчитаны семейства гидрооптических эхосигналов для оптической схемы лидара с теневой диафрагмой. В данном случае учитывались все разумные кратности рассеяния. Были использованы две индикатрисы рассеяния морской воды — $g_1(\theta)$ и $g_2(\theta)$ [6], где θ — угол рассеяния фотонов, отсчитываемый от направления распространения лазерного луча. Индикатриса $g_1(\theta)$ очень сильно вытянута вперед и больше соответствует морской воде, удаленной от берегов и содержащей гидрозоль биологического происхождения, т.е. крупные и оптически мягкие частицы [6]. Индикатриса $g_2(\theta)$ менее вытянута вперед, так как предполагает наличие большего количества мелких частиц минерального происхождения, более присущих прибрежным районам. Отметим также, что индикатриса $g_2(\theta)$ имеет меньшее абсолютное значение в направлении $\theta = 0^\circ$, однако обратное рассеяние для нее в направлении 180° относительно сильнее.

На рис. 4 приведены семейства эхосигналов, смоделированных для различных экспериментальных ситуаций. Везде в расчетах заложена высота лидара над водой $H_0 = 200$ м. По оси абсцисс отложено расстояние от лидара вертикально вниз в метрах. По оси ординат — относительная мощность принимаемого сигнала в долях от единичного посланного лазерного фотона. Расходимость лазерного луча равна 1 мрад, длина волны его излучения составляет 532 нм. Лазерный импульс для расчетов можно считать δ -импульсом, так как это единичный фотон. Площадь приемника и коэффициент пропускания всего оптического тракта также единичны. Плоское ламбертово дно моря находится на глубине 25 м. Его альбедо равно 0,05, что можно соотнести по отражательной способности с серым илом. Френелевское отражение света от поверхности воды не учитывается, так как оно, во-первых, содержит только неинформативное для нас зеркальное отражение и однократное рассеяние, а во-вторых — лишь маскирует своей большой амплитудой интересующие нас физические процессы в водной толще.

При анализе результатов отметим вначале тот факт, что подводный сигнал до глубины 2 м возрастает по мощности. Это связано с тем, что многократное рассеяние возникает не мгновенно, а увеличивается постепенно, пока процессы экспоненциального ослабления эхосигналов в водной толще не начинают превалировать над процессами многократного рассеяния. Кроме того, добавим, что здесь графики величин показаны в линейном масштабе для большей выразительности рассматриваемых явлений.

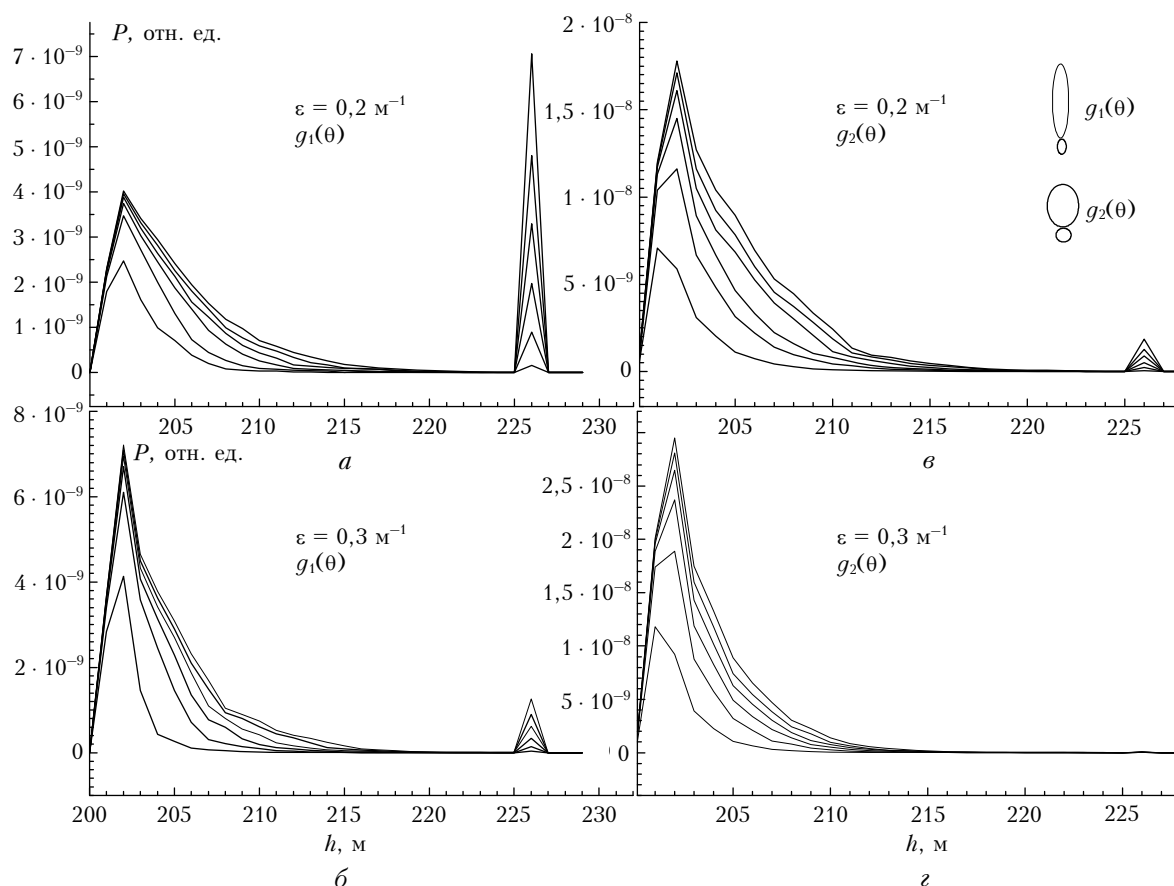


Рис. 4. Расчетные эхосигналы для однородной воды с индикатрисами рассеяния $g_1(\theta)$ и $g_2(\theta)$ и показателем ослабления $\varepsilon = 0,2$ и $0,3 \text{ м}^{-1}$ на глубине 25 м. Угол поля зрения приемника по мере увеличения сигналов соответствует 2,0; 4,0; 6,0; 8,0; 10,0 и 13,0 мрад. Геометрические фигуры — условные изображения индикатрис рассеяния

Итак, если рис. 4 рассмотреть парами по вертикали, то результат будет качественно предсказуемым. При увеличении показателя ослабления воды подводный приповерхностный сигнал возрастает, но по мере углубления зондирующего импульса эхосигнал убывает быстрее, чем для более прозрачной воды. С увеличением угла поля зрения приемника абсолютные значения эхосигналов также возрастают, но этот рост имеет свой физический предел, так как практически уже все излучение вышних кратностей перехвачено приемной оптической системой. Если же рис. 4 рассматривать попарно слева направо, то видно интересное влияние особенностей индикатрисы рассеяния гидрозоля даже для этой однородной водной массы.

Отражения от дна на рис. 4, б в разы меньше таких же отражений на рис. 4, а, хотя показатель ослабления воды у них одинаковый и равен $0,2 \text{ м}^{-1}$. Для рис. 4, в, г результат еще более впечатляющий: сигнал от дна полностью исчез. Объяснение этому следует из физики рассеяния света («индикатрисный эффект»). Индикатриса $g_2(\theta)$ на рис. 4, в, г — более «округлая», она быстрее выводит из конуса визирования приемника рассеянные фотоны любой кратности. То есть суммарная энергия зондирующего импульса, включающая в себя как прямое, еще не

рассеянное излучение, так и одно- и многократно рассеянное излучение получается меньше, чем в воде с сильно вытянутой вперед индикатрисой $g_1(\theta)$.

В свою очередь, рис. 5 отображает более сложную и интересную ситуацию и его анализ может быть полезным при интерпретации результатов зондирования различных подводных образований. Здесь на глубине от 15 до 20 м (т.е. несколько выше дна) находятся нефелоидные слои двух типов, упомянутых выше. Кстати, в реальном эксперименте такие слои были обнаружены шведскими учеными достаточно давно и опубликованы в [5]. Тогда контрольный корабельный акустический эхолот регистрировал только относительно глубокое реальное дно минерального происхождения, а лазерный локатор показывал только некое менее глубокое «ложное» дно над ним. До реального дна сквозь мутный нефелоидный слой луч лазера не пробивался. Но на рис. 5 налицо несколько другое воплощение индикатрисного эффекта, частично рассмотренного нами ранее в [6].

Рассмотрим рис. 5, а и б. В этой ситуации вертикальное строение водной толщи слоистое, но уже по показателю ослабления. Индикатриса рассеяния в обоих случаях — $g_1(\theta)$. Для рис. 5, а вода, в общем-то, относительно прозрачная и $\varepsilon = 0,2 \text{ м}^{-1}$, но нефелоидный слой на высоте 10 м над дном (т.е.

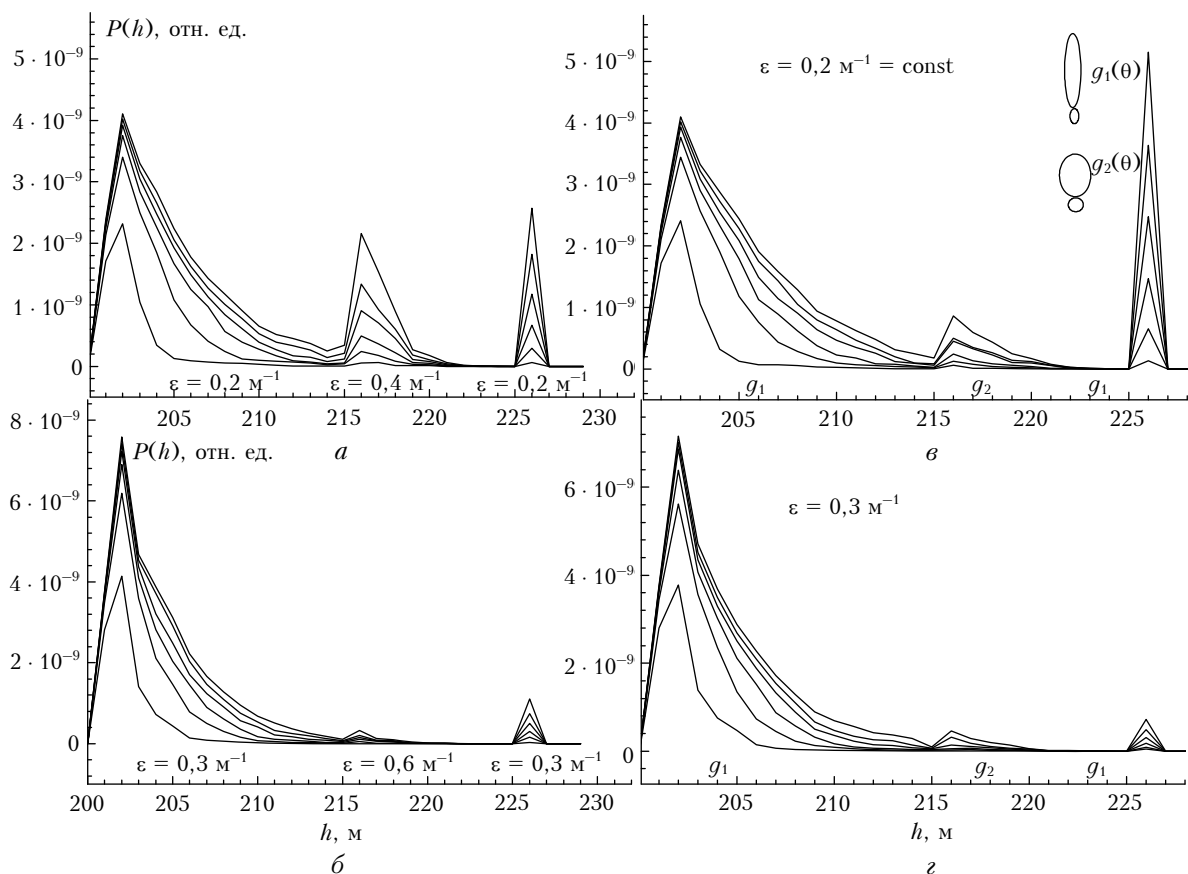


Рис. 5. Расчетные сигналы для слоисто-неоднородной водной толщи: *a* и *б* – индикатриса рассеяния всей водной толщи $g_1(\theta)$, на глубине 15 м находится слой толщиной 5 м с повышенной мутностью; *в* и *г* – на глубине 15 м находится слой с индикатрисой рассеяния $g_2(\theta)$. Значения ϵ постоянны по глубине. $\theta = 2,0; 4,0; 6,0; 8,0; 10,0$ и $13,0$ мрад по мере возрастания мощности эхосигналов. Геометрические фигуры – условные изображения индикатрис рассеяния; h – расстояние от лидара

на глубине 15 м) в 2 раза мутнее, и $\epsilon = 0,4 \text{ м}^{-1}$. Для рис. 5, *б* ситуация аналогичная, но первоначальная толща однородной воды на 50% мутнее, чем указано на рис. 5, *а*.

В обоих случаях – и при более чистой, и при более мутной воде – наддонный нефелоидный слой еще более высокой замутненности дает эффект «ложного» дна. Как и должно быть, сигнал от нефелоидного слоя уменьшается в разы для $\epsilon = 0,3 \text{ м}^{-1}$ по сравнению с $\epsilon = 0,2 \text{ м}^{-1}$ из-за экспоненциального влияния ослабления излучения в водной толще.

Теперь обратим внимание на рис. 5, *в*, *г*. Здесь по всей толще воды до дна показатель ослабления постоянен: $0,2 \text{ м}^{-1}$ (рис. 5, *в*) и $0,3 \text{ м}^{-1}$ (рис. 5, *г*). Но нефелоидный слой, находящийся на той же глубине, имеет совершенно другую природу и индикатрису $g_2(\theta)$, обеспечивающую относительно большее обратное рассеяние. И, как результат, при постоянном по всей глубине профиле $\epsilon(h)$ можно наблюдать ложное дно, и притом весьма отчетливо, особенно для более прозрачной водной массы. Сигналы же от собственно дна не слишком сильно отличаются от таковых при зондировании через однородную воду (сравним с рис. 4, *а*, *б*). То есть здесь экспоненциальное ослабление в основной водной толще почти одинаковое. Разница только в наличии аномального

нефелоидного слоя, который быстрее выбрасывает фотоны из конуса визирования лидара вбок за счет более «округлой» индикатрисы рассеяния.

Наконец, оценим некий «эффективный показатель ослабления» излучения ϵ_T , получаемый из подводного эхосигнала в режиме теневой диафрагмы. Реально – это показатель ослабления сигнала для совокупности всех кратностей рассеяния (кроме первой, разумеется). Тем не менее этот параметр ϵ_T может оказаться полезным для оценки истинного значения ϵ как показателя ослабления существующей водной толщи и дальнейшего его использования для задач гидрооптического зондирования, в том числе и батиметрии. Оценка производилась общеизвестным методом логарифмической производной эхосигнала от однородной водной толщи, начиная с момента начала спада сигнала после поверхности моря до появления импульса от дна.

Именно этот параметр приведен на рис. 6 в зависимости от полного, т.е. наружного, угла поля зрения. Этот результат получен вычислениями по данным рис. 4 (рис. 5 до глубины расположения нефелоидного слоя аналогичен рис. 4). Видно, что зависимость $\epsilon_T = \epsilon_T(\theta)$ – монотонно спадающая при увеличении УПЗ (угол поля зрения), с тенденцией выхода к насыщению. Абсолютные значения ϵ_T

являются достаточно близкими к «истинным» значениям, заложенным в моделирование.

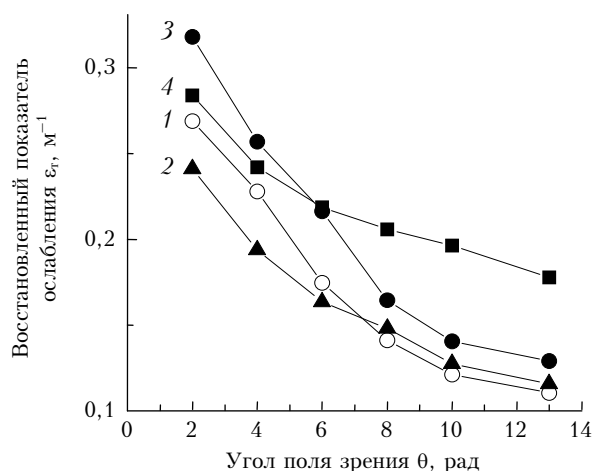


Рис. 6. Восстановленный показатель ослабления многократно рассеянного излучения ϵ_r . Кривые 1 и 2 — $\epsilon = 0,2 \text{ м}^{-1}$, индикатрисы соответственно $g_2(\theta)$ и $g_1(\theta)$; 3 и 4 — $\epsilon = 0,3 \text{ м}^{-1}$, индикатрисы $g_2(\theta)$ и $g_1(\theta)$

По аналогии с контрастностью экспериментальных сигналов от дна нами были рассчитаны контрастности модельных сигналов, представленных на рис. 4 и 5. (Напомним, что мощности табулированных сигналов от воды вблизи дна (в отличие от сигналов рис. 4, 5) не равны нулю.) Величины контрастов вычислялись как отношения максимумов сигналов от дна (расстояние от лидара 226 м, т.е. глубина 26 м) к сигналу последнего строба от собственно воды (расстояние от лидара 224 м). Для «ложного дна», т.е. нефелоидного слоя, эти расстояния брались соответственно 216 и 214 м. Полученные результаты сведены в табл. 2. Ее содержание сводится к следующему.

Контрастность теневых сигналов от дна при моделировании во всех случаях гораздо выше, чем в эксперименте. И это понятно: нет влияния шумов различного типа, очень высока разрешающая способность во времени, оптические параметры воды фиксированы. Однако не наблюдается жесткой взаимосвязи между контрастностью и комбинациями типа индикатрисы рассеяния воды с ее показателем ослабления. Многократное рассеяние света, выброс фотонов из конуса визирования лидара весьма многообразно связаны с этими комбинациями и приводят к большим вариациям абсолютных значений контрастности. Увеличение параметра ϵ снижает значения K , но вариации индикатрисы не дают здесь явной зависимости.

С точки зрения лазерного зондирования наиболее полезным оказался расчет контрастности сигналов от «ложного» дна, т.е. от слоя гидрозолей над реальным дном. По расчетным данным она на два порядка ниже контрастности сигналов от собственно дна (разумеется, для выбранных нами условий моделирования). Но тем не менее по порядку величины она совпадает с экспериментально измеренными нами и приведенными в начале статьи значениями.

Контрастность модельных эхосигналов от истинного и «ложного» дна для различных условий эксперимента по рис. 4 и 5

Условия моделирования эксперимента	Средняя контрастность	Разброс контраста, %
Рис. 4, а. Дно. Вода однородная с $g_1(\theta)$, $\epsilon = 0,2 \text{ м}^{-1}$	$(0,94 \pm 0,72) \cdot 10^3$	77
Рис. 4, б. Дно. Вода однородная с $g_1(\theta)$, $\epsilon = 0,3 \text{ м}^{-1}$	$(0,27 \pm 0,12) \cdot 10^3$	44
Рис. 4, в. Дно. Вода однородная с $g_2(\theta)$, $\epsilon = 0,2 \text{ м}^{-1}$	$(0,51 \pm 0,15) \cdot 10^3$	29
Рис. 4, г. Дно. Вода однородная с $g_2(\theta)$, $\epsilon = 0,3 \text{ м}^{-1}$	$(0,37 \pm 0,10) \cdot 10^3$	27
Рис. 5, а. Дно. Вода неоднородная, основная толща: $g_1(\theta)$; $\epsilon = 0,2 \text{ м}^{-1}$	$(1,0 \pm 0,36) \cdot 10^3$	36
Рис. 5, б. Дно. Вода неоднородная, основная толща: $g_1(\theta)$; $\epsilon = 0,3 \text{ м}^{-1}$	$(0,67 \pm 0,12) \cdot 10^3$	18
Рис. 5, в. Дно. Вода неоднородная с $\epsilon = 0,2 \text{ м}^{-1}$, индикатриса — переменная	$(3,80 \pm 1,30) \cdot 10^3$	34
Рис. 5, г. Дно. Вода неоднородная с $\epsilon = 0,3 \text{ м}^{-1}$, индикатриса — переменная	$(1,66 \pm 2,07) \cdot 10^3$	124
Рис. 5, а. Слой с индикатрисой $g_1(\theta)$, ϵ в 2 раза больше	$10,9 \pm 1,9$	17
Рис. 5, б. Слой с индикатрисой $g_1(\theta)$, ϵ в 3 раза больше	$5,7 \pm 3,2$	56
Рис. 5, в. Слой с $\epsilon = 0,2 \text{ м}^{-1}$, индикатриса $g_2(\theta)$	$2,3 \pm 0,7$	30
Рис. 5, г. Слой с $\epsilon = 0,3 \text{ м}^{-1}$, индикатриса $g_2(\theta)$	$2,4 \pm 1,8$	75

Здесь величины сигналов адекватно соответствуют задней полусфере индикатрисы рассеяния гидрозолей, т.е. обратному рассеянию. Следовательно, в реальности действительно имеется принципиальная опасность протектировать именно «ложное» дно и выдать его на практике за реальное.

Подводя итог, можно отметить следующее. Действительно, использование в гидрооптическом лидаре теневой диафрагмы позволяет увеличить контрастность эхосигналов от дна или иных твердых образований. Необходимо проявлять осторожность при интерпретации таких сигналов для нейтрализации влияния различного рода нефелоидных слоев. Из-за сильного влияния многократного рассеяния обработка эхосигналов даже от неаксиальной части полного гидрооптического сигнала позволяет получить физически достоверные данные о показателе ослабления излучения в воде и использовать их в дальнейшей работе.

1. Коханенко Г.П., Пеннер И.Э., Шаманаев В.С. Последствие в фотоэлектронных умножителях при регистрации лидарных сигналов в токовом режиме // Радиотехн. и электрон. 2004. Т. 49. № 3. С. 1–9.
2. Гладких В.А., Лизогуб В.Г., Коханенко Г.П., Шаманаев В.С. Особенности временных характеристик ФЭУ-144 в режиме управления усилением // Приборы и техн. эксперим. 1996. № 1. С. 85–88.
3. Swarner W.G., Prettyman C.E. Optical spatial filter for modification of received energy vs range. Patent USA No. 3.712.985. Class 250–216. 1973.
4. Billard B., Abbot R.H., Penny M.F. Airborne estimation of sea turbidity parameters from the WRELADS laser airborne depth sounder // Appl. Opt. 1986. V. 25. N 13. P. 2080–2088.
5. 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.
6. Коханенко Г.П., Крекова М.М., Пеннер И.Э., Шаманаев В.С. Обнаружение неоднородностей гидрозоля поляризационным лидаром // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17. № 9. С. 750–758.

V.S. Shamanaev, I.A. Penner, M.M. Krekova. **Shadow field stop for a hydrooptical lidar.**

Experiments on sensing of the sea bottom of shallow water were carried out with an airborne lidar. To reduce glint reflections from the sea water surface in lidar returns, the axial region of the receiving lidar telescope was screened by a shadow field stop. In this case, the entire lidar return from water depth is formed only by multiply scattered radiation. Such lidar configuration improves the contrast of signals from the sea bottom. Operation of the lidar with the shadow field stop was simulated by the Monte Carlo method. It is demonstrated that the application of the shadow field stop in the airborne hydrooptical lidar is an effective method of increasing the contrast of lidar returns from the sea bottom. From nonaxial underwater lidar returns comprising only multiple scattering, the effective water extinction index was reconstructed using the logarithmic derivative method. Due to the influence of multiple scattering, this parameter depends on the field-of-view angle of the lidar receiver; however, in any case it has physically reliable values.