

## ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.463.5:535.36

# Обнаружение косяков морских рыб с помощью метода поляризационного лазерного зондирования

**В.С. Шаманаев\***

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 24.07.2017 г.

С использованием метода Монте-Карло исследованы общие закономерности формирования лидарного сигнала при зондировании водной толщи, содержащей косяки пелагических рыб. Результаты статистического моделирования глубинных профилей мощности лидарного сигнала и его деполяризации позволяют предложить метод поляризационного лазерного зондирования косяков морских рыб, базирующийся на сравнении количественных значений мощности и деполяризации лидарного эхосигнала с некоторыми пороговыми уровнями измеряемых величин, которые устанавливаются в зависимости от конкретных значений коэффициента ослабления морской воды в акватории промысла.

*Ключевые слова:* самолетный лидар, поляризация, оптика океана, биопродуктивность, дистанционное зондирование; airborne lidar, polarization, ocean optics, bioproductivity, remote sensing.

### Введение

Методы дистанционного обнаружения косяков рыбы, особенно пелагических видов, мигрирующих в толще воды, представляют несомненный практический интерес. Тела рыб являются объектами с отличными от воды светорассеивающими свойствами, поэтому лидарный эхосигнал от них отличается от сигнала от собственно водной толщи. Как правило, обычная глубина обитания косяков рыбы (это сотни метров) превосходит предельные глубины лазерного зондирования. Но их суточный биоритм таков, что в астрономическое ночное время косяки рыб поднимаются к поверхности воды, вплоть до нулевых отметок [1] независимо от климатического сезона.

Исторически первыми в теории лидарного обнаружения косяков рыбы, вероятнее всего, были D. Murphree et al. [2]. Первые экспериментальные работы в опытовом бассейне выполнили шведские ученые [3]. Последовательно решал эту задачу J. Churnside (NOAA), опубликовавший цикл работ расчетного характера, результаты экспериментов в бассейнах и натурного зондирования (например, [4–6]). Подобные работы выполнялись и в Институте оптики атмосферы СО РАН, причем оценочные расчеты проводились с использованием метода Монте-Карло, но по ряду причин результаты данных исследований не были опубликованы ранее.

В настоящей работе проведена статистическая оценка глубинного профиля лидарного сигнала при зондировании водной толщи, содержащей косяки пелагических рыб, и на основании анализа получен-

ных результатов предложен метод их поляризационного лидарного обнаружения.

### Модель среды

Применительно к специфике самолетного лазерного зондирования гидрооптические свойства морской воды определяются тремя оптически активными компонентами: чистой водой, растворенными биологическими веществами и гидрозолевой взвесью. Оптические характеристики морской воды, используемые в оптике океана, — это показатели поглощения, рассеяния и суммарного ослабления лидарного сигнала, а также индикатриса рассеяния  $g(\theta)$ , описывающая зависимость интенсивности рассеяния от угла  $\theta$  между направлением рассеянного и падающего на элементарный объем светового пучка. Суммарный показатель ослабления  $\sigma_{\text{ext}} = \sigma_{\text{sw}} + \sigma_{\text{aw}} + \sigma_{\text{ss}} + C_{\text{ch}}\alpha_{\text{ch}} + C_{\text{y}}\alpha_{\text{y}}$ , где  $\sigma_{\text{sw}}$  и  $\sigma_{\text{aw}}$  — показатели рассеяния и поглощения чистой водой;  $\sigma_{\text{ss}}$  — показатель рассеяния взвешенными в воде частицами;  $C_{\text{ch}}$ ,  $C_{\text{y}}$  и  $\alpha_{\text{ch}}$ ,  $\alpha_{\text{y}}$  — концентрации и удельное поглощение хлорофилла и желтого вещества (растворенная органика, накопившаяся в воде за тысячи лет). Собственно молекулярное рассеяние света водой подчиняется закону Рэлея и практически одинаково для всех вод мирового океана. На длине волны  $\lambda = 0,53$  мкм  $\sigma_{\text{sw}} = 1,5$  км<sup>-1</sup>, а  $\sigma_{\text{aw}} = 22$  км<sup>-1</sup>. Диапазон изменения оптических характеристик морской воды очень велик: 2–3 порядка величины в зависимости от ее химико-физического состава.

Мощность лидарного сигнала определяется также формой индикатрисы рассеяния. Особенности экспериментальных индикатрис рассеяния для морской воды были рассмотрены в [7], для узких све-

\* Виталий Сергеевич Шаманаев (shvs@iao.ru).

товых пучков – в [8]. Нами они были проанализированы в [9].

Усредненные модельные индикатрисы рассеяния лазерного излучения, использованные в настоящей работе, показаны на рис. 1. Рассеивающие свойства воды в инверсионном слое с преобладанием частиц минерального происхождения задавались менее вытянутой в направлении вперед индикатрисой  $g_1(\theta)$  [9], вне инверсии – наиболее вытянутой  $g_4(\theta)$ . Промежуточные случаи представлены индикатрисами  $g_2(\theta)$  и  $g_3(\theta)$ .

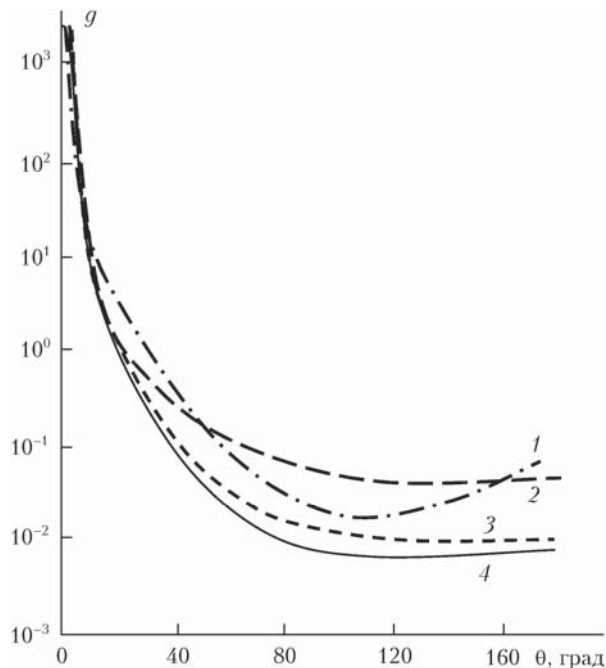


Рис. 1. Усредненные модельные индикатрисы рассеяния морской воды  $g_1(\theta)$ – $g_4(\theta)$  (1–4), использованные в расчетах методом Монте-Карло

## Результаты статистического моделирования

Рассмотрим один из результатов статистического моделирования глубинных профилей мощности и деполаризации лидарного сигнала, рассчитанных методом Монте-Карло [9].

Расчеты проводились для моностатического поляризационного лидара, расположенного на высоте  $H$  над поверхностью моря. Лазерное излучение посылается вертикально вниз, проходит через раздел «воздух–вода», поглощается и рассеивается в воде, в которой на заданной глубине расположен рыбный косяк, отражается от него, пересекает границу «вода–воздух» и регистрируется детектором. В качестве дополнительного носителя полезной информации в первом приближении рассматривается сигнал однократного рассеяния в направлении оптического детектора.

На рис. 2 показан типичный профиль мощности лидарного эхосигнала в относительных единицах.

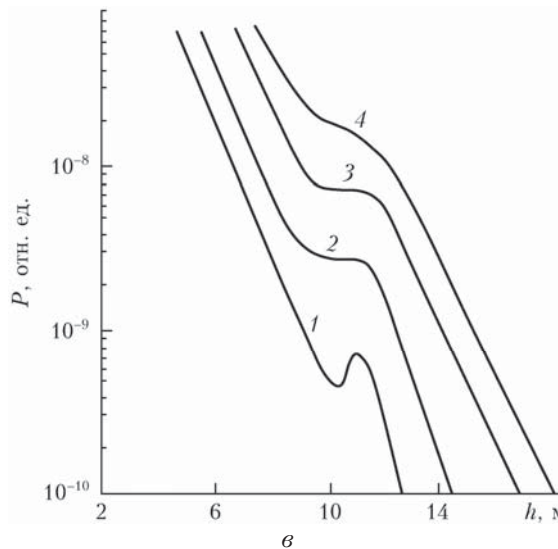
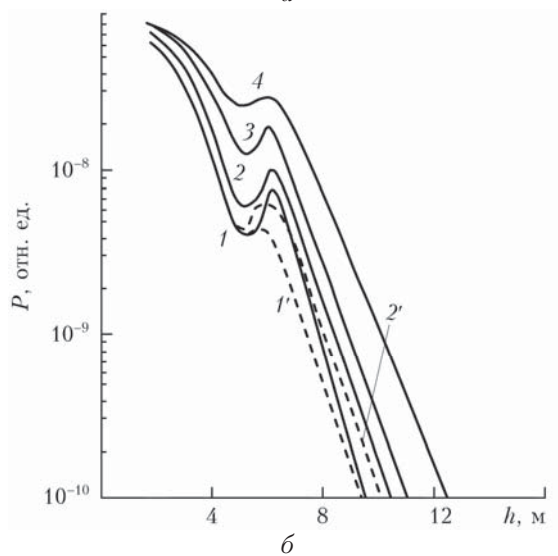
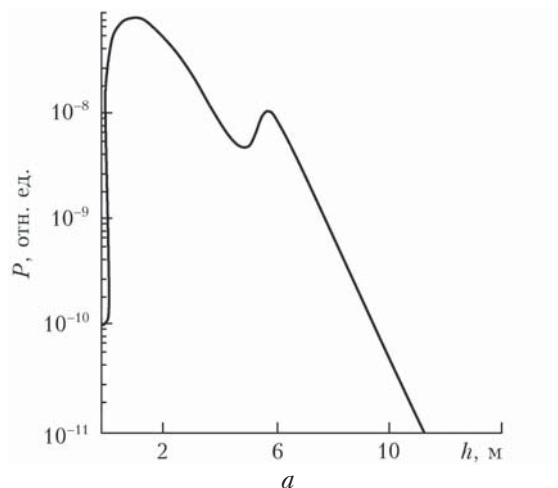


Рис. 2. Глубинный профиль мощности лидарного сигнала  $P(h)$ . Самолет находится на высоте  $H = 200$  м; показатель ослабления воды  $\sigma_{ext} = 0,3 \text{ м}^{-1}$ ; глубина верхней границы косяка рыб 5 м; угол поля зрения лидара  $\theta = 3,4$  мрад (а); глубина косяка 5 и 10 м;  $W_f = 0,1$  (сплошные кривые) и 0,05 (пунктир);  $\theta = 3,4$  (кривая 1); 7 (2); 14 (3) и 22 мрад (4) (б, в)

Коэффициенты ослабления излучения на длине волны 532 нм были постоянными по всей толще воды и атмосферы.

На временной развертке локационного сигнала наблюдаются три максимума: первый обязан своим происхождением рассеянию на частицах атмосферного аэрозоля; второй сформирован практически зеркальным сигналом, отраженным от границы «воздух–вода» и излучением, рассеянным тонким поверхностным слоем воды (как рассеивающей среды высокой оптической плотности). Увеличение глубины зондирования  $h$  сопровождается быстрым спадом интенсивности эхосигнала. При соответствующих оптико-геометрических условиях, о которых будет сказано ниже, на временной развертке эхосигнала появляется третий максимум, обязанный отражению от спинок рыб. Возможность его регистрации зависит от величины многократного рассеяния в воде и вероятности присутствия отражающего объекта (рыбы)  $W_f$  в данной области, т.е. от альbedo спинок рыб и их концентрации в косяке. Очевидно, параметр  $W_f$  определяет уровень мощности сигнала  $P_{\text{тар}}$ , отраженного непосредственно от объекта промысла. Значения  $W_f = 0,1$  примерно соответствует концентрации  $N = 50 \text{ м}^{-3}$  отражателей типа мойва или сардина.

Известно, что временной (и глубинный) профиль деполаризации  $\delta(h)$  в «чистой» однородной воде имеет монотонно возрастающий характер, но в месте нахождения объекта промысла возникает особенность первого рода. Однако характер этой особенности, т.е. скачка в профиле деполаризации  $\delta(h)$ , существенно зависит от свойств объекта. Для объяснения этой особенности требуется дополнительный анализ. На заднем фронте сигналов возникают пики, полочки или иные отклонения от монотонного спада. Как правило, интерпретация результатов зондирования в таких ситуациях сопряжена со значительными трудностями в силу известной неоднозначности обратных задач лазерного зондирования. В этом плане метод Монте-Карло позволяет создать некую расчетную реперную базу данных, которую можно использовать для сравнительного анализа с экспериментами. Такой подход впервые предложен в 1991 г. на тематическом семинаре по лазерному зондированию суши и моря [10, 11]. Был представлен так называемый индикатрисный эффект, описывающий эхосигналы при зондировании воды с непостоянной по глубине индикатрисой рассеяния, непостоянным показателем рассеяния и различными их комбинациями. Развитие вычислительной техники позволило усложнить задачи, решаемые методом Монте-Карло.

Этот алгоритмический подход был развит в [9], где рассмотрено влияние неоднородностей, связанных с изменением концентрации гидрозоля, на формирование локационного сигнала и его поляризационных характеристик; показана слабая чувствительность деполаризации к профилю коэффициента ослабления в малых углах поля зрения приемника лидара, так как в узком конусе визирования сосредоточено излучение низких кратностей рассеяния.

С увеличением углов приема величина деполаризации  $\delta(h)$  становится более зависимой от особенностей глубинного профиля показателя ослабления  $\sigma_{\text{ext}}(h)$  вследствие того, что к отраженному от гидрозолей сигналу добавляется излучение, многократно рассеянное под большими углами, с более высокой деполаризацией, т.е. многократное рассеяние из помехи становится информативной составляющей сигнала.

Анализ результатов расчетов методом Монте-Карло показывает, что изменение оптической плотности морской воды сопровождается (при соответствующих оптико-геометрических условиях наблюдения) детерминированным появлением максимумов на амплитудно-временной характеристике относительной мощности сигнала  $P(h)$  и его деполаризации  $\delta(h)$ .

На рис. 3 кривыми 1 и 2 показаны результаты расчетов для ситуаций, когда по всей глубине ослабление  $\sigma_{\text{ext}}(h) = \text{const} = 0,22 \text{ м}^{-1}$  [12]. Это «чистая»

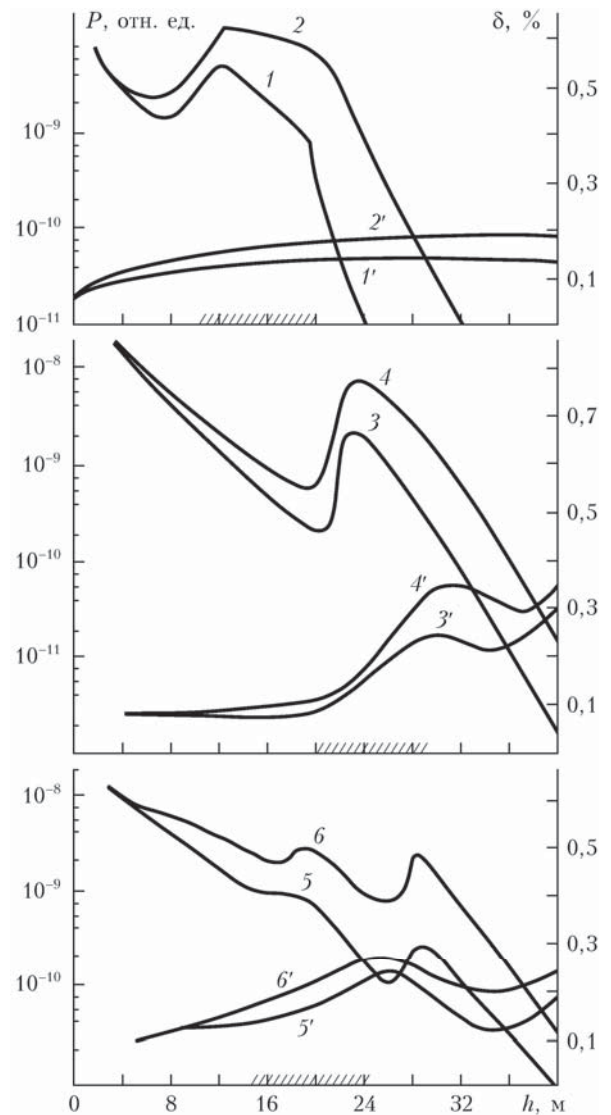


Рис. 3. Расчетные профили мощности  $P(h)$  (1–6) и деполаризации  $\delta(h)$  лидарного сигнала (1'–6') при наличии подводных слоев гидрозоля;  $\theta = 5$  (1, 3 и 5) и 10 град (2, 4 и 6)

морская вода. В слое с оптической инверсией гидрозоля толщиной  $\Delta h = 10$  м, находящемся на глубине  $h = 10$  м, изменяется только дисперсный состав гидрозольной взвеси, что приводит к изменению индикатрисы рассеяния в этом слое. Максимум на временной развертке сигнала  $P(h)$  вызван только увеличением в области инверсии показателя обратного рассеяния, согласно виду  $g_2(\theta)$ . Сопоставляя рассчитанные для данного случая значения деполяризации  $\delta(h)$  с аналогичными результатами для воды однородного состава, можно отметить, что особенностей в поведении  $\delta(h)$  не наблюдается. При вариации углов приема качественный характер глубинного хода  $\delta(h)$  сохраняется.

Кривые 3 и 4 на рис. 3 соответствуют иной оптической ситуации, когда на глубине  $h = 20$  м предполагается присутствие слоя гидрозольной инверсии с одновременно изменяющимися концентрацией частиц и составом взвеси. Предполагается, что показатель ослабления в слое  $\sigma_{\text{ext}}(h) = 0,6 \text{ м}^{-1}$ , а рассеивающие свойства описываются функцией  $g_2(\theta)$ ; вне слоя  $\sigma_{\text{ext}} = 0,18 \text{ м}^{-1}$ , а индикатриса рассеяния  $g_4(\theta)$ . Подобная оптическая ситуация может быть вызвана таким процессом, как вынос реками ила в море. Для водных масс рассматриваемого типа характерно высокое содержание частиц минерального происхождения и менее асимметричная индикатриса рассеяния (типа  $g_1(\theta)$  или  $g_2(\theta)$ ). На временной развертке  $P(h)$  наблюдается мощный всплеск, вызванный как скачком оптической плотности среды, так и увеличением доли рассеянного излучения в области локационных углов, согласно виду индикатрисы  $g_2(\theta)$ . Происходит также изменение поляризационной структуры сигнала: уровень деполяризации  $\delta(h)$  быстро нарастает в области инверсии, а вне ее происходит некоторый спад  $\delta(h)$  ввиду резкого снижения показателя ослабления. Рост  $\delta(h)$  в инверсионном слое более динамичен, чем в том случае, когда в области инверсии изменяется только уровень концентрации взвеси. Это связано с меньшей асимметрией индикатрисы рассеяния  $g_2(\theta)$ , приводящей к росту деполяризации фоновой составляющей сигнала  $\delta_{\text{bg}}(h)$ .

Результаты, представленные кривыми 5 и 6, иллюстрируют еще одну возможную оптическую ситуацию, когда возникновение инверсионного слоя повышенной оптической плотности вызвано процессами биологического характера. Это может быть слой фитопланктона с высокой концентрацией относительно крупных органических частиц, который характеризуется высокоасимметричной сильно вытянутой вперед индикатрисой рассеяния типа  $g_4(\theta)$ . Инверсионный слой толщиной  $\Delta h = 10$  м расположен на глубине  $h = 15$  м;  $\sigma_{\text{ext}}(h) = 0,55 \text{ м}^{-1}$  в слое и  $0,20 \text{ м}^{-1}$  вне его; индикатриса рассеяния  $g_2(\theta)$ . На временной развертке эхосигнала видны два максимума: первый обязан скачку плотности среды, второй вызван изменением ее рассеивающих свойств за пределами инверсионного слоя. Первый максимум может быть слабо выражен ввиду того, что повышение оптической плотности в слое компенсируется

снижением показателя обратного рассеяния в соответствии с величиной  $g(\pi)$ . Уровень деполяризации сигнала  $\delta(h)$  резко возрастает в области инверсии, за ее пределами снижается, а затем вновь нарастает за счет фоновой многократного компонента сигнала. Второй максимум  $P(h)$  приходится на область спада параметра  $\delta(h)$ .

Серия выполненных расчетов, часть из которых проиллюстрирована результатами, приведенными на рис. 3, показала, что появление экстремума на амплитудно-временной характеристике сигнала, связанного только с изменением рассеивающих свойств в водной среде, не сопровождается экстремальными изменениями его поляризационной структуры.

## Результаты экспериментов

Результаты вышеприведенных численных экспериментов согласуются с данными натурных экспериментальных измерений, которые представлены на рис. 4. Эксперимент выполнялся в районе Баренцева моря с помощью поляризационного бортового лидара «Макрель» [13].

Лидар располагался на борту самолета, высота полета над уровнем моря составляла 200 м, угол расходимости источника  $\varphi_s = 1$  мрад, угол приема  $\varphi_d = 13$  мрад. Ниже будут проанализированы результаты экспериментов, в которых глубинные профили поляризованного  $P_{\parallel}$  и кросс-поляризованного  $P_{\perp}$  компонентов сигнала имели особенности. В серии измерений наблюдалось детерминированное (но все-таки не полностью синхронное) появление максимумов на обоих компонентах сигнала. Одна из реализаций на рис. 4 представлена кривыми 1, 2, характеризующими поведение амплитудно-временной характеристики мощности  $P(h) = P_{\perp}(h) + P_{\parallel}(h)$  и деполяризации  $\delta(h) = P_{\perp}(h)/P_{\parallel}(h)$  лидарного сигнала. На основании выполненных теоретических оценок [10] можно предполагать в данном случае наличие на глубине  $h \approx 12$  м гидрозольного слоя с повышенной концентрацией взвеси.

Следующую серию измерений иллюстрируют кривые 3 и 4. О присутствии на глубине  $h \approx 18$  м инверсионного слоя свидетельствует экстремум на амплитудно-временной характеристике сигнала  $P(h)$ . Профиль  $\delta(h)$  не имеет явных особенностей. По нашим оценкам, подобное поведение  $P(h)$  и  $\delta(h)$  может быть связано с относительно высоким содержанием мелких частиц минеральной фракции в инверсионном слое. Но профиль  $\sigma_{\text{ext}}(h)$  практически не изменяется на исследуемом интервале глубин. Это предположение согласуется с данными расчетных оценок, показанных кривыми 1 и 2 на рис. 3.

Кривые 5 и 6 на рис. 4 соответствуют серии измерений еще в одном участке моря. Максимумы на профилях  $P(h)$  и  $\delta(h)$  указывают на присутствие инверсионного слоя на глубине  $h \approx 13-15$  м. Относительно высокий уровень деполяризации сигнала в области этого слоя свидетельствует о значительном увеличении в нем концентрации частиц гидрозоля, а следовательно,  $\sigma_{\text{ext}}(h)$ . Но более слабый



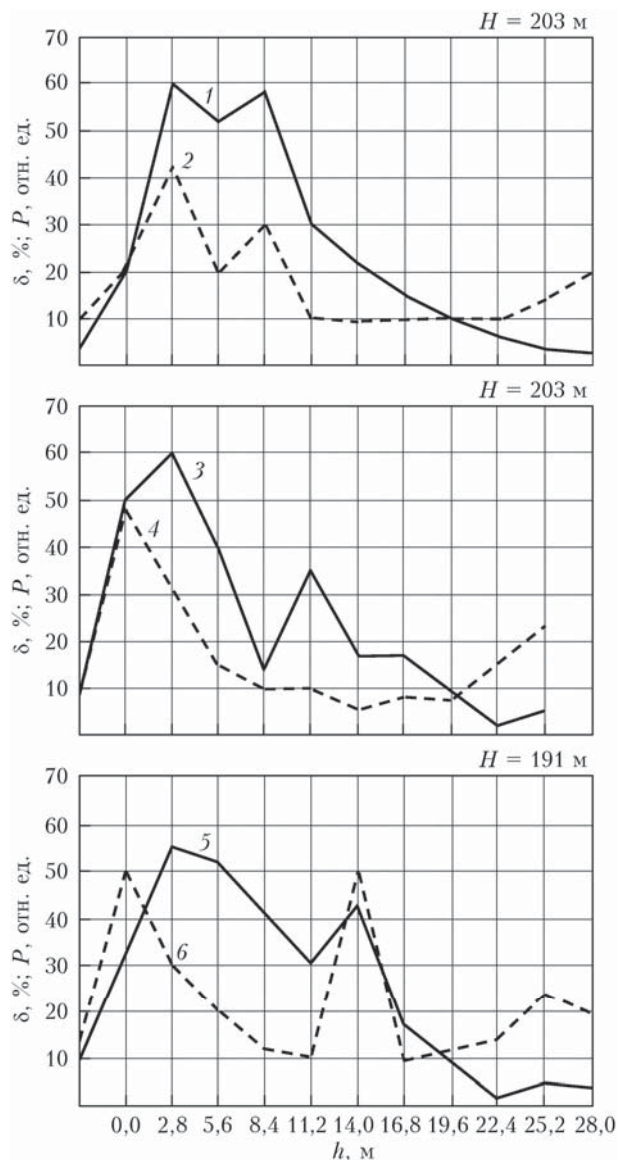


Рис. 4. Экспериментальные профили мощности эхосигналов (сплошная линия) и их деполаризации (пунктирная линия) для различных акваторий Баренцева моря ( $H$  – высота полета)

максимум на  $P(h)$  при простом рассмотрении не согласуется с резким ростом  $\sigma_{\text{ext}}(h)$ . Такое несоответствие взаимного поведения  $P(h)$  и  $\delta(h)$  устраняется, если предположить, что в инверсионном слое изменились и концентрация, и фракционный состав частиц (т.е. индикатриса рассеяния). Скачок оптической плотности компенсируется снижением доли рассеянного назад излучения, которое характерно для вод с преобладанием крупной органической фракции частиц, а в оптических свойствах основной массы воды определяющую роль играют частицы минерального происхождения. Это предположение согласуется с данными расчетных оценок, показанными кривыми 5, 6 на рис. 3.

Очевидно, что при отсутствии одновременных измерений всех компонентов матрицы рассеяния для различных типов вод предложенный анализ резуль-

татов натуральных измерений можно рассматривать лишь как иллюстрацию того, что объем полезной информации, извлекаемой из лидарных измерений, может быть значительно расширен.

Уравнение лазерного зондирования, записанное с обобщенным учетом многократного рассеяния, выглядит следующим образом:

$$P(h) = Ah^{-2}\sigma_{\pi}e^{-2\sigma_{\text{ext}}(h-H)}[1 + D(h-H)]. \quad (1)$$

Здесь  $\sigma_{\pi}$  – коэффициент обратного рассеяния воды;  $H$  – расстояние от лидара до воды;  $A$  – аппаратная функция лидара;  $D$  – аддитивная добавка, описывающая вклад многократного рассеяния в принятый сигнал. Эта добавка зависит от параметров системы «лидар–вода» и монотонно возрастает с глубиной.

При использовании линейно-поляризованного зондирующего излучения уравнение (1) записывается двумя уравнениями для компонентов  $P_{\parallel}(h)$  и  $P_{\perp}(h)$ . Частицы взвешенных в воде минеральных гидрозолей имеют небольшие размеры по сравнению с длиной волны лазерного излучения и близкую к сферической форму. Поэтому при однократном рассеянии на малых глубинах они слабо деполаризуют излучение лазера, а поляризованный компонент значительно превосходит по мощности деполаризованный. По мере увеличения глубины проникновения в воду влияние многократного рассеяния возрастает, что приводит к увеличению доли деполаризованного излучения в эхосигнале лидара. Степень деполаризации эхосигнала плавно и монотонно возрастает, хотя оба компонента сигнала монотонно убывают с глубиной. Если на пути луча возникает относительно тонкий слой более мутной воды (минеральная взвесь, микроорганизмы и т.п.), то он дает всплеск на поляризованном сигнале, а многократное рассеяние в тонком слое сформироваться не успевают и на деполаризованном сигнале выраженного всплеска не будет.

## Алгоритм обнаружения косяка рыбы

Картина изменяется при рассеянии света на ансамбле крупных диффузных рассеивателей неправильной формы, какими являются тела рыб. Здесь излучение лазера скачком деполаризуется до значительной величины. Абсолютное значение степени деполаризации зависит от состояния поверхности рассеивателя (спинки рыб) и может изменяться в несколько раз в зависимости от его размеров, особенностей строения (чешуи) и т.д., т.е. будет выполняться условие  $0 \leq P_{\perp}/P_{\parallel} = \frac{b}{a} \leq 1$  ( $a$  и  $b$  – по-

ляризационные коэффициенты, конкретные значения которых на данном этапе не принципиальны).

Итак, пусть граница косяка находится на некоторой глубине  $H_1 > H$ . К центру косяка концентрация рыб возрастает [14]. Для зондирующего излучения это эквивалентно возрастанию рассеивающей способности по некоему закону  $f(h - H_1)$ ,

где  $h > H_1$ , конкретный вид которого сейчас не важен, и площади рассеивающей поверхности рыб в единице объема (аналог параметра  $\sigma_\pi$  для воды). При наличии косяка рыбы уравнение зондирования для двух компонентов полного лидарного сигнала будет иметь вид:

$$\begin{aligned} P_{\parallel}(h) &= Ah^{-2}e^{-2\sigma_{\text{ext}}(h-H)} \times \\ &\times [\sigma_\pi + \delta_{\parallel}(h-H)\sigma_\pi + af(h-H_1)], \\ P_{\perp}(h) &= Ah^{-2}e^{-2\sigma_{\text{ext}}(h-H)} \times \\ &\times [\sigma_\pi\delta_{\perp}(h-H) + bf(h-H_1)]. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $\delta_{\parallel}$  и  $\delta_{\perp}$  — поляризованная и деполяризованная доли многократного рассеяния в сигнале соответственно. Сечение обратного рассеяния от рыб в косяке распределяется на обе составляющие пропорционально деполяризующей способности рыб  $b/a$  (конкретные ее значения до настоящего времени экспериментально не измерялись). В этой записи не учитывается френелевское отражение от границы раздела «воздух—вода», так как оно развязано во времени с подводным сигналом от объекта промысла.

В (2) быстрее всего убывает экспоненциальный множитель. Дифференцирование уравнений (2) по глубине дает

$$\begin{aligned} \frac{1}{P_{\parallel}(h)} \frac{dP_{\parallel}(h)}{dh} &= \frac{af'(h-H_1) + \sigma_\pi\delta'_{\parallel}(h)}{af(h-H_1) + \sigma_\pi + \sigma_\pi\delta_{\parallel}(h)} - 2\sigma_{\text{ext}}, \\ \frac{1}{P_{\perp}(h)} \frac{dP_{\perp}(h)}{dh} &= \frac{bf'(h-H_1) + \sigma_\pi\delta'_{\perp}(h)}{bf(h-H_1) + \sigma_\pi\delta_{\perp}(h)} - 2\sigma_{\text{ext}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Вблизи границы косяка концентрация рыбы, а следовательно, и функция  $f(h-H_1)$  быстро возрастают; еще быстрее возрастает ее производная  $f'$ . Многократное рассеяние и функции  $\delta_{\parallel}(h)$ ,  $\delta_{\perp}(h)$ ,  $\delta'_{\parallel}(h)$ ,  $\delta'_{\perp}(h)$  возрастают значительно медленнее. Кроме того, отражательная способность воды значительно хуже отражательной способности рыбы в косяке. В связи с этим на обеих составляющих поляризационных функций  $P_{\parallel}(h)$  и  $P_{\perp}(h)$  возникает всплеск. Его величина, как легко можно видеть, связана простой зависимостью с функцией  $f(h-H_1)$ , описывающей оптические свойства косяка, и с оптическими свойствами воды. Последнее объясняется тем, что чем мутнее вода и больше  $\sigma_{\text{ext}}$ , тем сильнее сигнал от воды, маскирующий сигнал от рыбы.

В чистой морской воде вдали от берега, когда  $\sigma_{\text{ext}}$  и  $\sigma_\pi$  малы, реализуются условия, при которых

$$\begin{aligned} \frac{1}{P_{\parallel}(h)} \frac{dP_{\parallel}(h)}{dh} &= \frac{d}{dh}(\ln P_{\parallel}(h)) \approx \frac{f'(h-H_1)}{f(h-H_1)} - 2\sigma_{\text{ext}}, \\ \frac{1}{P_{\perp}(h)} \frac{dP_{\perp}(h)}{dh} &= \frac{d}{dh}(\ln P_{\perp}(h)) \approx \frac{f'(h-H_1)}{f(h-H_1)} - 2\sigma_{\text{ext}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь уже не нужно априорное знание деполяризующей способности рыб. Из (4) получаются два соотношения:

$$\begin{aligned} \frac{f'(h-H_1)}{f(h-H_1)} - \frac{d}{dh}(\ln P_{\parallel}(h)) &\geq 2\sigma_{\text{ext}}, \\ \frac{f'(h-H_1)}{f(h-H_1)} - \frac{d}{dh}(\ln P_{\perp}(h)) &\geq 2\sigma_{\text{ext}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Эти неравенства можно рассматривать как совокупность признаков для обнаружения косяков рыбы в водной толще. Величина  $\sigma_{\text{ext}}$ , т.е. параметр прозрачности воды, представляет собой естественный порог, превышение которого сигнализирует о наличии под водой объекта промысла. В качестве первого приближения для практического использования можно рекомендовать табличные данные о величине  $\sigma_{\text{ext}}$  для различных типов вод (т.е. данные районирования морей), но можно и оперативно оценивать ее значение из сигналов самого лидара, используя те или иные алгоритмы решения обратной задачи.

## Заключение

Таким образом, предложенный метод поляризационного лазерного зондирования, базирующийся на регистрации глубинного профиля мощности и деполяризации сигнала лидара и использовании естественного порога в виде измеренного коэффициента ослабления морской воды, позволит существенно увеличить достоверность обнаружения подводных скоплений рыбы. Эффективность метода подтверждена также результатами натуральных экспериментов.

Автор выражает благодарность профессору И.В. Самохвалову за полезные замечания по содержанию работы.

1. Юдович Ю.Б., Барал А.А. Промысловая разведка рыбы. М.: Пищевая промышленность, 1968. 303 с.
2. Murphree D.L., Taylor C.D., McClendon R.V. Mathematical modeling for the detection of fish by an airborne laser // AIAA J. 1974. V. 12, iss. 12. P. 1686–1692.
3. Fredriksson K., Galle B., Nystrom K., Svanberg S., Ostrom B. Underwater laser-radar experiments for bathymetry and fish-school detection. Chalmers Univ. of Tech., Goteborg Inst. of Physics Rep. GIPR-162, 1978. 28 p.
4. Churnside J.M., Demer D.A., Mohmoudi D. A comparison of lidar and echosounder measurements of fish schools in the Gulf of Mexico // ICES J. Mar. Sci. 2003. V. 60. P. 147–154. DOI: 10.1006/jmsc2003.1327.
5. Churnside J.M., Wilson J.J. Airborne imaging of salmon // Appl. Opt. 2004. V. 43, iss. 6. P. 1416–1424.
6. Churnside J.M., Wilson J.J., Tatarskii V.V. Lidar profiles of fish schools // Appl. Opt. 1997. V. 36, iss. 24. P. 6011–6020.
7. Petzold T.J. Volume scattering functions for selected ocean waters // Scripps Institution of Oceanography. Visibility laboratory. 1972. 79 p.
8. Копилевич Ю.И., Кононенко М.Е., Задорожная Е.И. Влияние индикатрисы рассеяния вперед на характеристики светового пучка в морской воде // Оптический журнал. 2010. Т. 77, № 10. С. 10–14.
9. 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, iss. 24. P. 5715–5720.
10. Shamanaev V.S., Krekova M.M., Penner I.E. The effect of optical characteristics of water on lidar bathymetry //

- Abstr. Papers "Workshop on Lidar Remote Sensing of Land and Sea", 6–8 May, 1991. Florence, Italy. P. 37.
11. *Shamanaev V.S., Krekova M.M., Penner I.E.* Polarization characteristics for lidar returns under the sea water // Abstr. Papers "Workshop on Lidar Remote Sensing of Land and Sea", 6–8 May, 1991. Florence, Italy. P. 38.
12. *Крекова М.М., Креков Г.М., Шаманаев В.С., Пеннер И.Э.* Оценки поляризационных характеристик сигнала лидара от морской воды, содержащей стратифицированные неоднородности // Оптика атмосфер. и океана. 1994. Т. 7, № 1. С. 67–75.
13. *Шаманаев В.С. Пеннер И.Э., Коханенко Г.П., Крекова М.М.* Самолетный лидар для зондирования океана // Наука – производству. 2003. № 9(65). С. 20–23.
14. *А.с. 1119456 SU A1, МКИ G 01 S 17/00.* Способ дистанционного обнаружения рыбных косяков / Шаманаев В.С. Опубл. в БИ. 1992. № 34.

*V.S. Shamanaev. Sea fish school detection by the method of polarization laser sensing.*

Main regularities of the formation of lidar returns in sensing of water depth comprising pelagic fish schools are determined by the Monte Carlo method. Based on the analysis of the results of statistical simulation of depth profiles of lidar signal power and depolarization, a method of polarization laser sensing for sea fish school detection is suggested using the depth profiles of lidar return signal power and depolarization and the natural threshold – the sea water extinction coefficient measured with the lidar.