

М.М. Крекова, Г.М. Креков, В.С. Шаманаев, И.Э. Пеннер

ОЦЕНКИ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛА ЛИДАРА ОТ МОРСКОЙ ВОДЫ, СОДЕРЖАЩЕЙ СТРАТИФИЦИРОВАННЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ

Представлены результаты численных и экспериментальных исследований, связанных с влиянием оптических неоднородностей различного происхождения на поляризационные характеристики сигнала лидара. Показано, что использование поляризованного излучения расширяет объем информации, извлекаемой из экспериментальных данных. Расчетные оценки выполнены для лидара, работающего на длине волны $\lambda = 0,53$ мкм, на этой же длине волны проведены натурные эксперименты в районе Баренцева моря.

Известно, что использование поляризованного излучения расширяет возможности лидарных методов зондирования атмосферы, увеличивая объем получаемой информации о состоянии среды и ее составе. Использование его для зондирования природных вод в задачах батиметрии или поиске косяков рыбы повышает надежность получаемой информации [1, 2]. Но интерпретация результатов экспериментальных измерений, выполненных с помощью поляризационного лидара, может оказаться затруднительной. Так, в целом ряде измерений, выполненных лидаром <Макрель> [3] в районе Баренцева моря, экстремальные особенности амплитудно-временной характеристики сигнала не сопровождалась изменениями его поляризационной структуры, либо при монотонном изменении амплитуды сигнала $I(h)$ зависимость степени деполаризации $\delta(h)$ имела более сложный характер. Очевидно, что экстремальное поведение амплитуды сигнала $I(h)$ связано с наличием на глубине инверсионных слоев, в которых изменяется либо концентрация частиц гидрозоля, либо их состав. Инверсионные слои возникают под действием различных гидродинамических, химических или биологических процессов, определяющих оптическую структуру воды в области инверсии. Для использования дополнительной информации, содержащейся в поляризационных измерениях, необходимы предварительные исследования реакции поляризационных характеристик на вариации оптических свойств в инверсионных слоях.

Указанные исследования могут быть выполнены в модельном численном эксперименте, позволяющем варьировать оптико-геометрические условия, отдельно анализировать роль различных факторов при формировании характеристик сигнала. Численный эксперимент выполнен методом Монте-Карло. Основы построения алгоритма и его особенности изложены в [4,5], поэтому укажем лишь основные моменты, определяющие начальные и граничные условия задачи. Расчеты выполнены для авиационных лидарных систем с учетом перспективности их использования для контроля очагов загрязнения, получения экспрессной информации о биооптическом состоянии региона, исследования оптической структуры приповерхностного слоя воды и др.

Предполагалось, что начальные и граничные условия задачи соответствуют типовой схеме моностатического лидара. Световой сигнал линейно поляризован, описывается δ -функцией во времени, падает нормально на плоскопараллельный рассеивающий слой. Источник расположен в плоскости $Y=0$ пространственных $\mathbf{r}(x, y, z)$ и угловых $\Omega(a, b, c)$ координат, излучает изотропно в конусе $2\pi(1 - \cos \varphi_s)$. Приемник имеет дискретный набор углов поля зрения $2\pi(1 - \cos \varphi_d^i)$, $i = 1, 2, \dots, n$. Лидарная система находится на расстоянии H от поверхности воды. В результате моделирования ансамбля траекторий реализуется статистическая оценка амплитудно-временных характеристик вектор-параметра Стокса $\mathbf{F}(I, Q, U, V)$ в окрестности заданного детектора. Далее определяется степень деполаризации излучения $\delta = (I - Q)/(I + Q)$. При построении алгоритма использовалась модификация локальной оценки сигнала [6], учитывающая высокую асимметрию индикатрис рассеяния морской воды.

Оптические свойства атмосферы над океаном соответствовали дымке M [7]. В расчетах учитывалось, что морская вода – многокомпонентная среда, поэтому коэффициент ослабления определялся как сумма аддитивных составляющих

$$\sigma_{\text{ext}} = \sigma_{\text{sw}} + \sigma_{\text{sh}} + \chi_w + C_{\text{ch}} \chi_{\text{ch}} + C_y \chi_y,$$

где σ_{sw} , χ_w , σ_{sh} – показатели рассеяния и поглощения чистой воды и гидрозоля; C_{ch} , C_y и χ_{ch} , χ_y – концентрации и удельные поглощения хлорофилла и желтого вещества. В соответствии с [8] они полагались равными $\chi_{\text{ch}} = 0,009 \text{ м}^2/\text{мг}$, $\chi_w = 0,0271 \text{ м}^{-1}$, $\chi_y = 0,022 \text{ м}^{-1}$, $\alpha_{\text{sw}} = 0,0023 \text{ м}^{-1}$. В качестве матриц рассеяния использованы массивы экспериментальных данных, полученных авторами [9] при измерениях в различных акваториях Тихого и Атлантического океанов. По объему выполненных измерений они представляются наиболее репрезентативными. Следует отметить, что матрицы рассеяния, измеренные в морских акваториях, например в водах Балтийского моря [10], идентичны измеренным в [9] по характеру поведения ее ненулевых компонент, а также близки количественно.

Рассеивающие свойства определяются соотношением концентраций крупных органических и мелких минеральных частиц. Это является причиной многообразия типов индикатрис рассеяния для морской воды. Используемые в расчетах индикатрисы рассеяния $g_i(\theta)$ (рис. 1) экспериментально измерены и взяты из [11, 12]. Их выбор отражает реальный диапазон изменения функций рассеяния. Так, индикатрисы $g_3(\theta)$ и $g_4(\theta)$ более характерны для открытых вод океанов, где преобладает органическая фракция частиц, а $g_1(\theta)$ и $g_2(\theta)$ – для вод с повышенным содержанием частиц минерального происхождения.

Расчеты выполнены для длины волны $\lambda = 0,53 \text{ мкм}$, угловая апертура источника $1/2\varphi_s = 0,5 \text{ град}$, а расстояние лидара от поверхности океана $H = 200 \text{ м}$.

Прежде чем перейти к обсуждению результатов расчетов поляризационных характеристик сигнала от воды, содержащей неоднородности, остановимся кратко на роли таких определяющих факторов, как матрица и индикатриса рассеяния. Их угловые зависимости показаны на рис. 1 и 2. Можно отметить, что количественные различия в матрицах $S_1(\theta)$ и $S_2(\theta)$ находятся в пределах $\sim 15\%$.

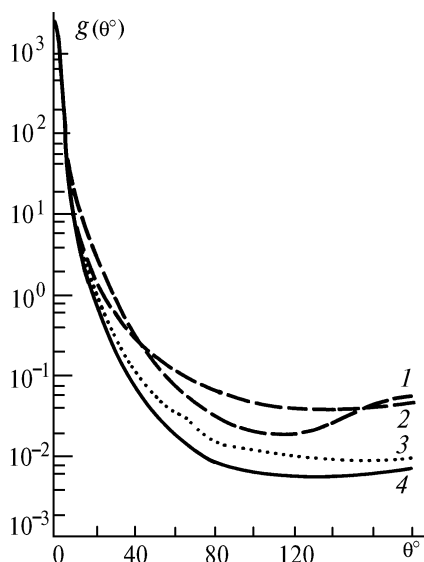


Рис. 1. Угловые зависимости нормированных индикатрис рассеяния $g_1(\theta)$, ..., $g_2(\theta)$ в соответствии с номерами кривых

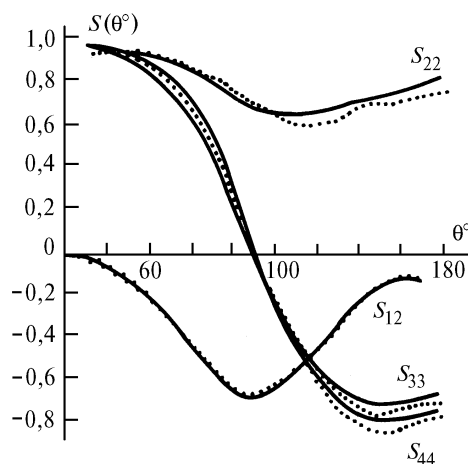


Рис. 2. Угловые зависимости приведенных компонент моделей матриц рассеяния $S(\theta)$. Сплошные линии – S_1 , точки – S_2

На рис. 3 приведены результаты расчетов степени деполаризации $\delta(\tau)$ для однородного состава воды с $\sigma_{\text{ext}}(h) = 0,22 \text{ м}^{-1}$. Расчеты выполнены для различных типов вод, отличающихся составом гидрозоля, и представлены на рисунке соответствующими сериями кривых. Числен-

ные оценки показывают, что небольшие различия в матрицах $S_1(\theta)$ и $S_2(\theta)$ приводят к заметным количественным изменениям степени деполяризации сигнала.

Сравним серии кривых, рассчитанных, например, для $g_4 S_1$ и $g_4 S_2$. Различия в уровнях деполяризации полного сигнала для двух матриц $S_1(\theta)$ и $S_2(\theta)$ обеспечиваются различием степени деполяризации однократного сигнала δ_0 . Полученное в расчетах с матрицей S_1 значение δ_0 составляло $0,08 \pm 0,09$, а с матрицей S_2 – $0,12 \pm 0,13$. Результаты, представленные на рис. 3, а также данные, приведенные в [1], показывают, что $\delta(h)$ в малых углах приема $\varphi_d \simeq \varphi_s$ имеет нейтральный ход. В этих условиях стабильность обеспечивается низкой деполяризацией фонового компонента сигнала $\delta_\phi(h)$, не превышающего уровня деполяризации однократного сигнала, вследствие того что вторичное рассеяние происходит в достаточно малой области углов θ , близких к π . В области этих углов поведение компонент матриц рассеяния достаточно устойчиво.

Форма индикатрисы рассеяния также оказывает существенное влияние на формирование поляризационной структуры отраженного гидрозолеом сигнала. Оно более значимо в условиях приема, когда $\varphi_d \gg \varphi_s$ и фон многократного рассеяния формируется с участием фотонов высоких кратностей рассеяния. Это подтверждается данными расчетов, приведенными на рис. 3. Сравним серии кривых, вычисленные при различных значениях φ_d для $g_4 S_1$ и $g_2 S_1$, а также $g_4 S_2$ и $g_2 S_2$.

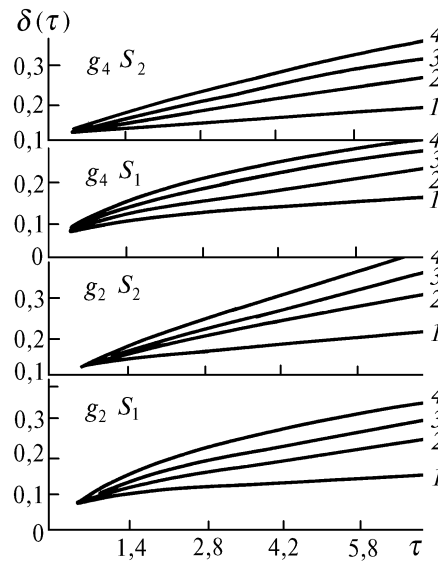


Рис. 3. Зависимость степени деполяризации от глубины зондирования для сред, отличающихся рассеивающими свойствами. Кривые 1 – 4 для углов приема $\varphi_d = 5; 10; 20$ и 35 мрад

Следует отметить, что до оптических глубин $\tau \leq 1,5$ влияние формы $g(\theta)$ на $\delta(h)$ слабо выражено для всех углов наблюдения φ_d^i ввиду того, что формирование эхосигнала в данной области обеспечивается фотонами низких кратностей рассеяния. Использование в расчетах различных сочетаний матриц и индикатрис рассеяния вызвано отсутствием информации об их взаимном соответствии. Данное обстоятельство несколько снижает значимость количественных оценок, но не препятствует качественному анализу.

Ранее в [13] нами было рассмотрено влияние неоднородностей, связанных с изменением концентрации гидрозоля, на формирование локационного сигнала и его поляризационных характеристик. Было показано, что чувствительность степени деполяризации к профилю коэффициента ослабления слабо выражена в малых углах приема, так как в конусе визирования сосредоточено излучение низких кратностей рассеяния. С увеличением углов приема $\delta(h)$ становится более зависимой от вида профиля $\sigma_{ext}(h)$, вследствие того что к отраженному сигналу добавляется излучение, рассеянное под большими углами с более высокой деполяризацией. Анализ расчетов показывает, что инверсия оптической плотности среды сопровождается при соответствующих оптико-геометрических условиях наблюдения согласованным появлением максимумов на амплитудно-временной характеристике сигнала $I(h)$ и его деполяризации $\delta(h)$.

Интерпретация результатов зондирования существенно усложняется, когда на пути луча возникают стратифицированные инверсионные слои, отличающиеся от основной массы воды составом взвеси. При этом изменяются рассеивающие свойства среды, т.е. количественные и качественные характеристики прежде всего индикатрисы рассеяния. Ниже рассмотрен ряд возможных вариантов оптических инверсий в глубине воды.

На рис. 4 посредством кривых 1 и 2 показаны результаты расчетов для ситуации, когда по всей глубине $\sigma_{ext}(h) = \text{const} = 0,22 \text{ м}^{-1}$. В инверсионном слое, находящемся на глубине $h = 10 \text{ м}$, толщиной $\Delta h = 10 \text{ м}$ изменяется только состав взвеси. Рассеивающие свойства воды в слое с преимуществом частиц минерального происхождения описываются функцией $g_1(\theta)$, вне инверсии – $g_4(\theta)$. Максимум на временной развертке сигнала $I(h)$ вызван только увеличением в области инверсии показателя обратного рассеяния согласно виду $g_2(\theta)$. Сопоставляя рассчитанные для данного случая значения $\Delta(H)$ с результатами для воды однородного состава (см. рис. 3), можно отметить, что особенностей в поведении $\delta(h)$ не наблюдается. При вариации углов приема качественный характер хода $\delta(h)$ сохраняется.

Кривые 3 и 4 на данном рисунке представляют иную оптическую ситуацию, в которой предполагается присутствие на глубине $h = 20 \text{ м}$ слоя гидрозольной инверсии с изменяющимися и концентрацией частиц, и составом взвеси. Полагалось, что показатель ослабления в слое $\sigma_{ext}(h) = 0,6 \text{ м}^{-1}$, а рассеивающие свойства описываются функцией $g_2(\theta)$, вне его $\sigma_{ext} = 0,18 \text{ м}^{-1}$, а индикатриса рассеяния – $g_4(\theta)$. Подобная оптическая ситуация может быть вызвана такими процессами, как вынос рек. Для водных масс данного типа характерно высокое содержание частиц минерального происхождения и менее асимметричная индикатриса рассеяния (типа g_1, g_2 на рис. 1). На временной развертке сигнала $I(h)$ наблюдается мощный всплеск, вызванный как скачком оптической плотности среды, так и увеличением доли рассеянного излучения в области локационных углов согласно виду $g_2(\theta)$. Происходит и изменение поляризационной структуры сигнала. Оно характеризуется быстрым нарастанием уровня деполяризации $\delta(h)$ в области инверсии, вне ее происходит некоторый спад $\delta(h)$ ввиду резкого снижения показателя ослабления. Рост $\delta(h)$ в инверсионном слое более динамичен, нежели в том случае, когда в области инверсии изменяется только уровень концентрации взвеси (см. рис. 4 [10]). Это связано с меньшей асимметрией индикатрисы рассеяния $q_2(\theta)$, приводящей к росту деполяризации фоновой составляющей сигнала $\delta_\phi(h)$.

Расчеты, представленные кривыми 5 и 6, иллюстрируют еще одну из возможных оптических ситуаций, когда возникновение инверсионного слоя высокой оптической плотности связано процессам биологического характера. Это может быть слой фитопланктона с высокой концентрацией относительно крупных органических частиц, который характеризуется высокоасимметричной индикатрисой рассеяния типа $g_4(\theta)$. Инверсионный слой расположен на глубине $h_0 = 15 \text{ м}$, $\Delta h = 10 \text{ м}$, в слое $\sigma_{ext}(h) = 0,55 \text{ м}^{-1}$, вне его $\sigma_{ext}(h) = 0,20 \text{ м}^{-1}$ и индикатриса рассеяния – $g_2(\theta)$. На временной развертке эхо-сигнала наблюдается два максимума, первый связан скачком плотности среды, второй вызван изменением рассеивающих свойств среды 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 фонового компонента сигнала, второй максимум на $I(h)$ приходится на область спада характеристики $\delta(h)$.

Серия выполненных расчетных оценок, часть из которых проиллюстрирована данными, приведенными на рис. 4, показала, что появление экстремума на амплитудно-временной характеристике сигнала, связанного только с изменением рассеивающих свойств в среде, не сопровождается экстремальными изменениями его поляризационной структуры.

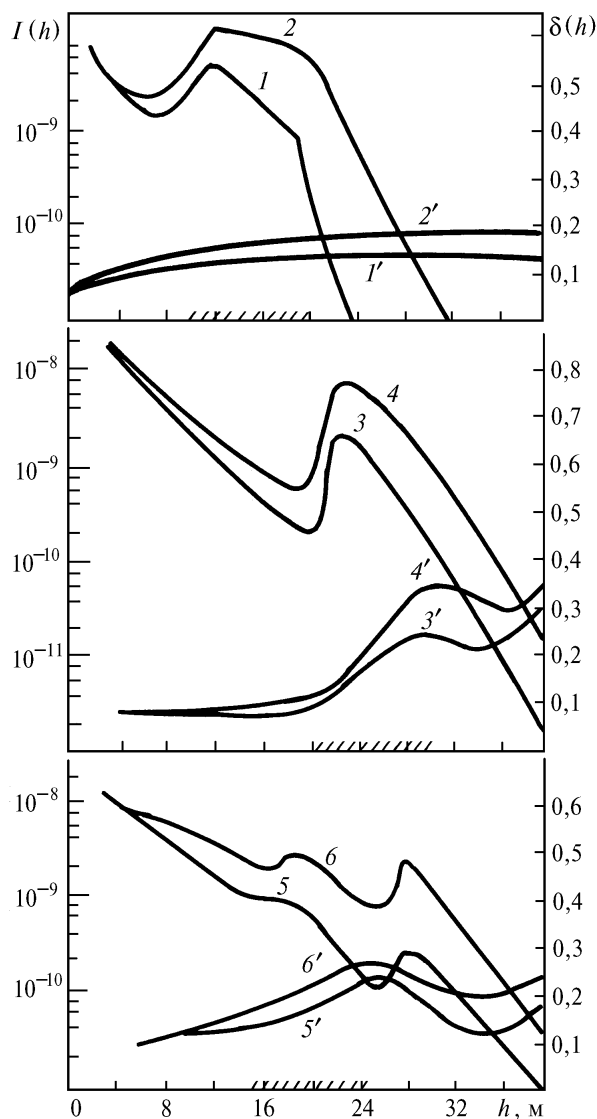


Рис. 4. Зависимости $I(h)$ и $\delta(h)$ при наличии на глубине инверсионных слоев различной стратификации. Кривые 1–6 – $I(h)$, 1'–6' – $\delta(h)$, 1, 3, 5 – для $\varphi_d = 5$; 2, 4, 6 – 10 мрад

Результаты вышеприведенных численных экспериментов согласуются с данными натурных экспериментальных измерений, приведенных на рис. 5. Эксперимент выполнялся в районе Баренцева моря с помощью поляризационного бортового лидара <МАКРЕЛЬ>, его технические данные указаны в [3].

Лидар располагался на борту самолета, высота полета которого над уровнем моря составляла примерно 200 м, угол расходимости источника $\varphi_s = 1$ мрад, угол приема $\varphi_d = 13$ мрад. Ниже будут проанализированы результаты экспериментов, в которых поведение линейного I_l и кроссполаризованного I_r компонентов сигнала имели особенности. В серии измерений наблюдалось согласованное появление максимумов на составляющих сигнала. Одна из реализаций представлена кривыми 1, 2 на рис. 5, характеризующими поведение амплитудно-временной $I(h) = I_l(h) + I_r(h)$ характеристики и степени деполаризации сигнала $\delta(h) = I_r(h)/I_l(h)$. На основании выполненных теоретических оценок [13] можно предполагать наличие в данном случае на глубине $h \approx 12$ м инверсионного слоя с повышенной концентрацией взвеси.

Следующую серию измерений иллюстрирует одна из реализаций, представленная на рисунке кривыми 3 и 4. О присутствии на глубине $h \approx 18$ м инверсионного слоя свидетельствует экстремум на амплитудно-временной характеристике сигнала $I(h)$. В то же время характеристика $\delta(h)$ не имеет заметных особенностей. По нашим оценкам подобное поведение $I(h)$ и

$\delta(h)$ может быть связано с относительно высоким содержанием частиц минеральной фракции в инверсионном слое, но профиль $\sigma_{ext}(h)$ практически не изменяется на исследуемом интервале глубин. Это предположение согласуется с данными расчетных оценок, представленных кривыми 1 и 2 на рис. 4.

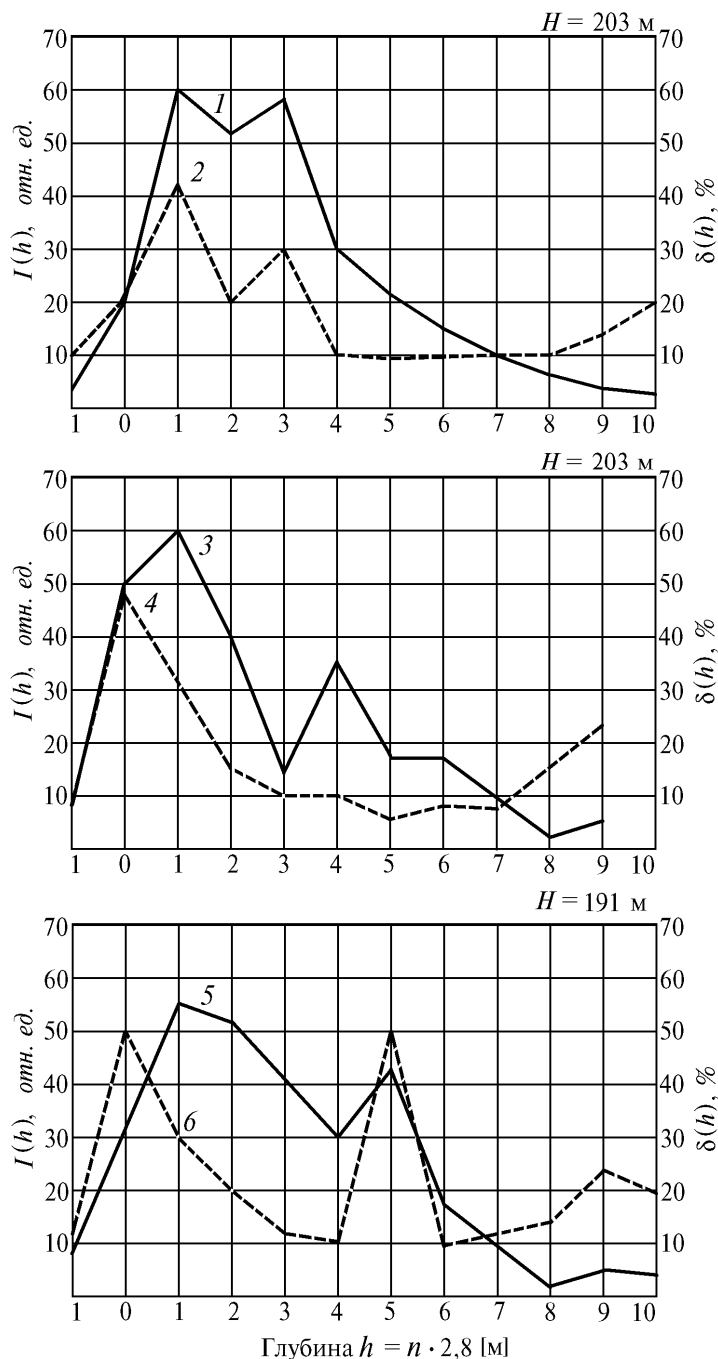


Рис. 5. Экспериментальные измерения зависимостей $I(h)$ и $\delta(h)$ для различных регионов Баренцева моря. Сплошная линия – сигнал, штриховая – деполаризация

Кривые 5 и 6 на рис. 5 иллюстрируют серию измерений еще в одном из регионов моря. Максимумы на характеристиках $I(h)$ и $\delta(h)$ указывают на присутствие инверсионного слоя на глубине $h \approx 13\text{--}15$ м. Высокий уровень деполаризации сигнала в области инверсии свидетельствует о значительном увеличении в нем концентрации частиц гидрозоля и, следовательно, $\sigma_{ext}(h)$. Но более слабовыраженный максимум на $I(h)$ не согласуется с резким ростом $\sigma_{ext}(h)$.

Несоответствие взаимного поведения $I(h)$ и $\delta(h)$ устраняется, если предположить, что в инверсионном слое изменились и концентрация, и фракционный состав частиц. Скачок оптической плотности компенсируется снижением доли рассеянного назад излучения, которое характерно для вод с преобладанием органической фракции частиц (см. индикатриса g_4 на рис. 1), а в оптических свойствах основной массы воды определяющую роль играют частицы минерального происхождения. Это предположение согласуется с данными расчетных оценок, представленных кривыми 5,6 рис. 4.

Очевидно, что при отсутствии одновременных измерений всех компонент матриц рассеяния для различных типов вод предложенный анализ результатов натурных измерений можно рассматривать как иллюстрацию того, что объем полезной информации, извлекаемой из лидарных измерений, может быть расширен.

Нужно отметить также, что при лазерном зондировании приповерхностного слоя воды с целью извлечения информации об ее оптических свойствах, с нашей точки зрения, более оправданно использование поляризованного излучения. Анализ обеих составляющих сигнала может позволить избежать ошибочной интерпретации результатов при наличии в воде стратифицированных неоднородностей различного происхождения.

1. Пеннер И.Э., Шаманаев В.С. //Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. N 1. С. 107–111.
2. Васильков А.П., Кондранин Т.В., Мясников Е.В. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1988. Т. 24. N 8. С. 873–881.
3. Абрамочкин А.И., Занин В.В., Пеннер И.Э., Тихомиров А.А., Шаманаев В.С. //Оптика атмосферы и океана. 1988. Т. 1. N 2. С. 92–94.
4. Зуев В.Е., Креков Г.М., Крекова М.М. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1988. Т. 19. N 6. С. 595.
5. Марчук Г.И., Михайлов Г.А. и др. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука, 1976. С. 284.
6. Белов В.В., Креков Г.М., Титов Г.А. //Вопросы дистанционного зондирования атмосферы/ Под ред. Зуева В.Е. Томск: ТФ СО АН СССР. 1975. С. 102–113.
7. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 165 с.
8. Дистанционное зондирование моря с учетом атмосферы //Под ред. В.А. Урденко, Г. Циммермана. ИКИ АН ГДР, 1985. 272 с.
9. Voss K.J., Fry E.S. //Appl. Optics. 1984. V. 23. N 23. P. 4427.
10. Кадышев Е.А. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1977. Т. 13. N 1. С. 108.
11. Kullenberg G. //Dep. Sea. Res. 1968. V. 15. P. 423.
12. Копелевич О.В. Оптические свойства морской воды: Дис. ... докт. техн. наук. 1987.
13. Креков Г.М., Крекова М.М. //Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. N 1. С. 73.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск
Сибирский медицинский университет

Поступила в редакцию
28 октября 1993 г.

M.M. Krekova, G.M. Krekov, V.S. Shamanaev, I.E. Penner. Estimation of the Polarization Characteristics of Lidar Return Signals from Sea Waters with Stratified Inhomogeneities.

Some results of numerical and experimental studies of the influence of different optical inhomogeneities of sea waters on the polarization characteristics of lidar return signals are presented in the paper. It is shown that the use of a polarized sounding radiation allows a sufficient increase of the bulk of information extracted from the experimental data to be reached. The calculational estimations are obtained for a lidar operating at the wavelength of sounding radiation $\lambda = 0,532 \mu\text{m}$. The same wavelength of sounding radiation was used in the experiments over Barents Sea.