

УДК 551.463.5:535.36

Гидрооптические сигналы поляризационного самолетного лидара при зондировании однородной толщи морской воды

В.С. Шаманаев*

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

Поступила в редакцию 4.02.2020 г.

Теоретически и экспериментально рассматриваются характерные особенности гидрооптических сигналов поляризационного самолетного лидара при зондировании однородной водной массы в контролируемых условиях. Полученные результаты могут быть использованы для расширения возможностей интерпретации лидарных сигналов, особенно в сложных и неоднозначных ситуациях. Приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований глубинных профилей гидрооптических сигналов поляризационных самолетных лидаров в условиях однородной водной толщи.

Ключевые слова: лидарное зондирование оптически плотных сред, поляризационный самолетный лидар, гидрооптика, светорассеяние; lidar sensing of optically dense media, airborne polarization lidar, hydrooptics, light scattering.

При гидрооптическом лазерном зондировании с борта летательного аппарата (самолет, вертолет, беспилотник) сигнал лидара включает в себя компоненты от надводной атмосферы, френелевской границы раздела воздух–вода и водной толщи, в том числе включающей в себя различные неоднородности. Поляризационный самолетный лидар позволяет интерпретировать лидарный сигнал именно от водной толщи [1]. При зондировании, как правило, используется линейно поляризованное излучение лазера. Если на трассе самолет–поверхность моря есть туман или иные частицы сферической формы, то рассеянное в направлении вперед на таких частицах излучение не изменяет состояние поляризации. Но тогда сохраняется и прямое, нерассеянное зондирующее излучение. В этом случае подводный гидрооптический сигнал формируется по обычным законам светорассеяния. Однако при наличии в надводной атмосфере кристаллов (снегопад, ледяная дымка) некоторая доля рассеянного вперед зондирующего излучения лазера деполаризуется, что влияет на локационный сигнал от водной толщи, искажая его форму.

Рассмотрим глубинный ход сигнала лидара для самолетной схемы зондирования моря с использованием малоуглового приближения уравнения лазерного зондирования (МУП УЛЗ) [2]. В УЛЗ такого вида входят три априорные характеристики: β_π , Λ , α — лидарное отношение, вероятность выживания фотона при рассеянии и параметр вытянутости индикатрисы рассеяния в направлении вперед. В монографии [3] были обобщены данные по значениям Λ и α . Поэтому наши расчеты выполнялись для фи-

зически обоснованных оптических параметров морской воды $\Lambda = 0,65 \div 0,85$ и $\alpha = 5 \div 8$. В [3] приведены экспериментально полученные корреляционные соотношения между показателем рассеяния при фиксированном угле рассеяния и общим показателем рассеяния, т.е. нечто близкое к лидарному отношению. Но достичь угла измерения 180° физически невозможно. При дополнительной обработке этих данных и экстраполяции до угла рассеяния 180° было получено усредненное значение $\beta_\pi = 0,0175 \text{ sr}^{-1}$ [2, 3]. Это существенно меньше, чем для атмосферных аэрозолей. Причина ясна — гораздо более вытянутая вперед гидрозольная индикатриса рассеяния (по сравнению с аэрозольной).

Расчеты мощности сигналов выполнялись для самолетного гидрооптического лидара, имеющего лазер с типичной длиной волны $\lambda = 532 \text{ нм}$; мощность импульса $P_0 = 1 \cdot 10^6 \text{ Вт}$; длительность импульса 10 нс; высота H_0 над уровнем моря 100; 200; 400 и 600 м (реально она задается физической высотой нижней границы облачности); угол поля зрения приемника 10; 20 и 30 мрад; площадь приемного телескопа $S_0 = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$. Показатель ослабления излучения в воде задается экспоненциальным множителем, поэтому его влияние не анализируется. Результаты расчетов представлены на рис. 1–3. Видно, что во всех случаях мощности лидарных сигналов превышают таковые для приближения однократного рассеяния.

В табл. 1 приведены отклонения мощности гидрооптических лидарных сигналов $P(z)$ от исходных величин при вариациях параметров, входящих в МУП УЛЗ, где z — глубина в воде. Столбцы 2–4 показывают, как влияют параметры морской воды и их вариаций на величину лидарного сигнала.

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

Таблица 1

Величина лидарного сигнала (отклонение $P(z)$ от исходного значения, Вт) в зависимости от параметров МУП УЛЗ

$z, \text{ м}$	$\Delta\Lambda = \pm 0,1; \Lambda = 0,75$ (13%)	$\Delta\alpha = \pm 1; \alpha = 7$ (14%)	$\Delta\varepsilon = \pm 0,1 \text{ м}^{-1}; \varepsilon = 0,3 \text{ м}^{-1}$ (33%)	$\Delta\Theta = 20 \text{ мрад}$		
				$\Delta\Theta = 10 \text{ мрад}$ (200%)		
				$H, \text{ м}$		
5	36 -36	-13 9	-1 -10	151	45	6
20	145 -145	-32 35	106 -110	804	15	231

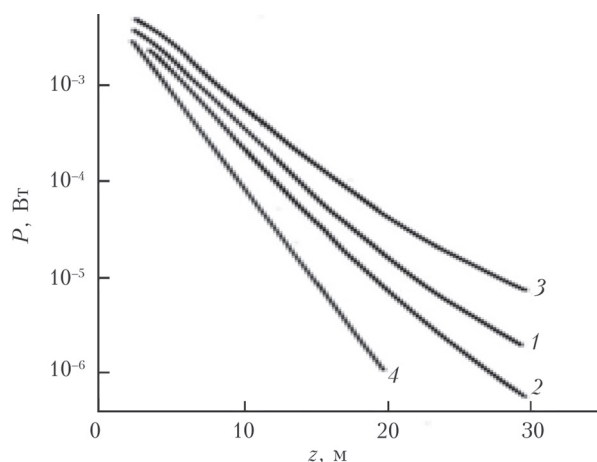


Рис. 1. Лидарные сигналы, рассчитанные в малоугловом приближении для $H_0 = 200 \text{ м}$, $\theta = 10 \text{ мрад}$, $\varepsilon = 0,3 \text{ м}^{-1}$, $\alpha = 7$; $\Lambda = 0,75$ (1), $0,65$ (2), $0,85$ (3); расчет в приближении однократного рассеяния (4)

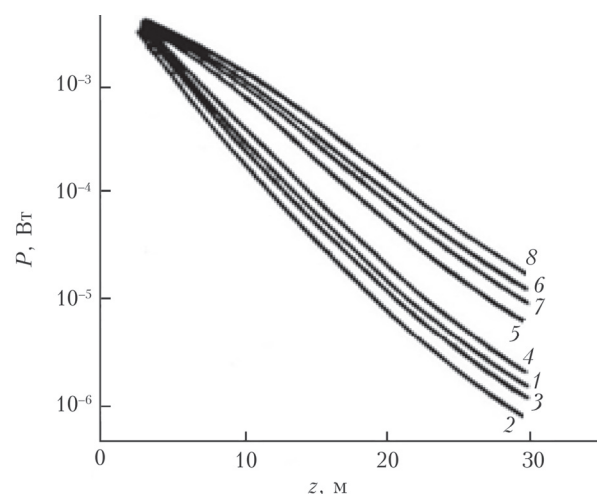


Рис. 2. Лидарные сигналы, рассчитанные для $H_0 = 200 \text{ м}$, $\Lambda = 0,75$, $\varepsilon = 0,3 \text{ м}^{-1}$; для $\theta = 10 \text{ мрад}$: $\alpha = 7$ (1), 5 (2), 6 (3), 8 (4); для $\alpha = 7$: $\theta = 20$ (5), 30 мрад (6); для $\theta = 30 \text{ мрад}$: $\alpha = 6$ (7), 8 (8)

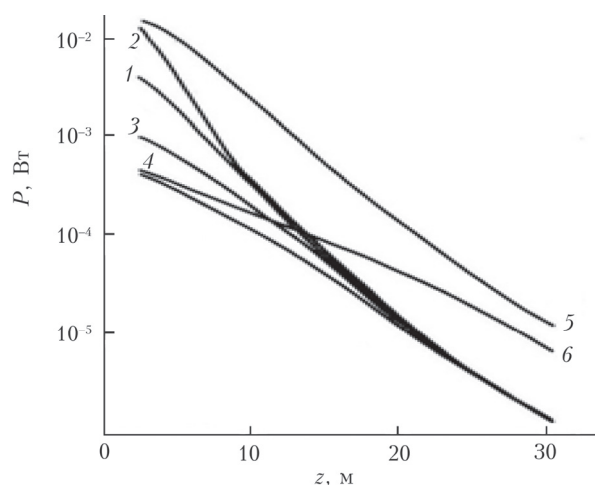


Рис. 3. Лидарные сигналы, рассчитанные для $\varepsilon = 0,3 \text{ м}^{-1}$, $\Lambda = 0,75$, $\alpha = 7$; для $\theta = 10 \text{ мрад}$: $H_0 = 200$ (1), 100 (2), 400 (3), 600 м (4); для $\theta = 30 \text{ мрад}$: $H_0 = 100$ (5), 600 м (6)

Хорошо видно влияние вероятности выживания фотона Λ (альbedo однократного рассеяния) на мощность лидарного сигнала, так как она связана с истинным поглощением в воде. Возрастанию параметра α соответствует увеличение вытянутости индикатрисы рассеяния в направлении вперед и соответствующее изменение доли многократного рассеяния.

Увеличение угла поля зрения лидара также ведет к возрастанию экосигнала за счет увеличения вклада многократного рассеяния. Однако чем выше находится лидар над водной поверхностью, тем слабее проявляется этот эффект. Эта интересная зависимость прослеживается в столбцах 5–7 табл. 1.

Что касается расположения лидара на разных расстояниях от поверхности воды (при фиксированных других параметрах), нетривиальный результат представлен на рис. 3 (кривые 1–4). На глубине $\sim 20 \text{ м}$ мощности экосигналов $P(z)$, независимо от высоты лидара, начинают стягиваться к одним и тем же значениям. Такая тенденция сохраняется и для относительно больших полей зрения (кривые 5, 6), что свидетельствует об ожидаемом возрастании доли МКР-излучения в сигнале за счет увеличения рассеивающего объема в воде. Этот эффект нивелирует уменьшение интенсивности лидарного отклика за счет фактора расстояния $(H + z/n)^2$ с увеличением высоты расположения лидара.

Проведенный анализ показывает, что при интерпретации результатов гидрооптического лидарного зондирования необходимо контролировать оптико-геометрические условия эксперимента, поскольку это влияет на МКР-излучение. Во всяком случае, необходимо оценивать параметр многократности рассеяния $\eta = H_0 \varepsilon \theta$ (ε – показатель ослабления), который позволяет просто и наглядно контролировать общую измерительную ситуацию.

Наиболее полную информацию при расчете глубинного профиля сигнала самолетного поляризованного лидара можно получить из решения уравнения переноса излучения методом статистических испытаний (Монте-Карло), который позволяет в заданных граничных условиях численно оценивать профили мощности сигнала самолетного лидара для реалистичных моделей атмосферы и однородной водной толщи моря с учетом отражения излучения от границы раздела воздух–вода. Детали вычислительного алгоритма и часть полученных данных были опубликованы ранее в [4, 5].

На рис. 4 приведена мощность лидарных сигналов в относительных единицах для высот полета самолета $H_0 = 200$ и 600 м. Высота 200 м была выбрана эмпирическим путем из типичной высоты нижней границы облачности для северных морей России. Показатель ослабления излучения был равен $0,323 \text{ м}^{-1}$, т.е. это не очень прозрачная вода. Параметр МКР η для $H_0 = 200$ м изменялся от $0,13$ до $0,90$, а для $H_0 = 600$ м — от $0,39$ до $0,78$. Френелевское отражение от поверхности воды не учитывалось. Для удобства сравнения кривых их максимумы приведены к единому значению.

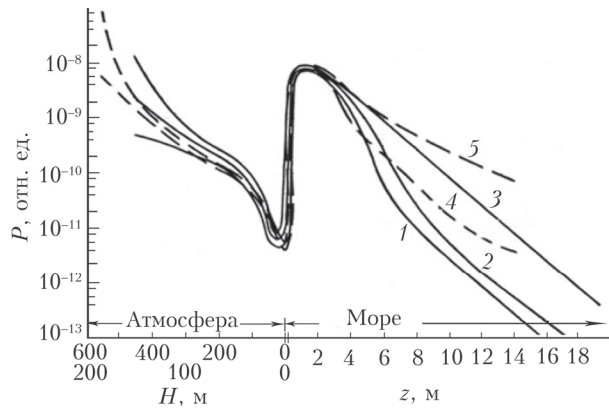


Рис. 4. Сигналы самолетного лидара: $H_0 = 200$ м, угол поля зрения приемника $\theta = 6$ (1), 12 (2) и 40 мрад (3); $H_0 = 600$ м, $\theta = 6$ (4) и 12 мрад (5); кривые 4 и 5 подняты по оси ординат на один порядок, чтобы совместить максимумы сигналов от воды. Френелевское отражение от поверхности воды отсутствует

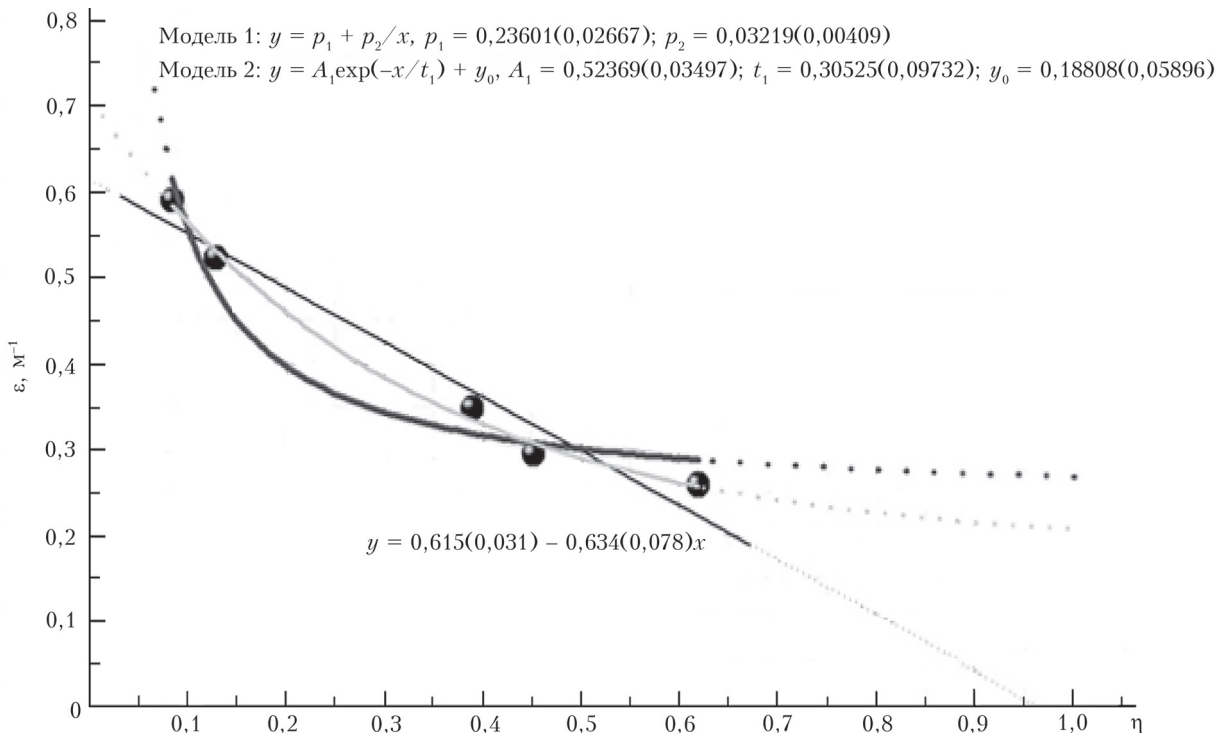


Рис. 5. Взаимная регрессия вычисленного из лидарного сигнала показателя ослабления излучения ϵ (точки) и параметра многократности рассеяния $\eta = H_0 \epsilon \theta$: линейная аппроксимация (серая прямая), модель 1 (черная кривая), модель 2 (серая кривая)

Видно, что, как и для МУП, при равных углах поля зрения с увеличением высоты полета доля многократного рассеяния увеличивается, что проявляется в более медленном затухании заднего фронта сигналов. На рис. 5 показана взаимосвязь η с ϵ , рассчитанная для лидарных сигналов. Необходимо только отметить, что приведенное здесь значение ϵ смещено в сторону меньших значений за счет вклада многократного рассеяния. Видно, что хорошей аппроксимацией здесь является линейная зависимость $\epsilon = \epsilon_0 - k\eta$ при $\epsilon_0 = 0,615 \pm (0,031)$ и $k = 0,634 \pm (0,078)$.

Как отмечалось в начале статьи, для поляризационного самолетного лидара имеются возможности интерпретации поведения лидарного сигнала именно от толщи воды. Однако для улучшения точности измерений желательно учитывать светорассеивающие свойства атмосферы. На рис. 6–8 представлены рассчитанные методом Монте-Карло профили деполаризации сигнала лидара $\delta(z)$ в однородной морской воде, которые иллюстрируют влияние деполаризирующей способности надводных аэрозолей.

Для расчета были использованы индикатрисы рассеяния морской воды $g_1(\gamma)$ и $g_2(\gamma)$, экспериментально измеренные в [6]. Здесь γ — угол рассеяния, а индикатриса $g_2(\gamma)$ более вытянута в направлении вперед. Высота лидара над водой 200 м. Дисперсный состав надводного аэрозоля на рис. 6 соответствует канонической дымке M Дейрменджана. Такая дымка практически не искажает состояние поляризации ни зондирующего луча, ни эхосигнала.

Видно плавное нарастание значений степени деполаризации с переходом к насыщению величи-

ны $\delta(z)$. Деполяризация растет быстрее при увеличивающемся поле зрения и при более вытянутой индикатрисе. Качественно это вполне совпадает с результатами лазерного зондирования такой оптически плотной среды, как облака (с учетом существующей разницы в показателях ослабления).

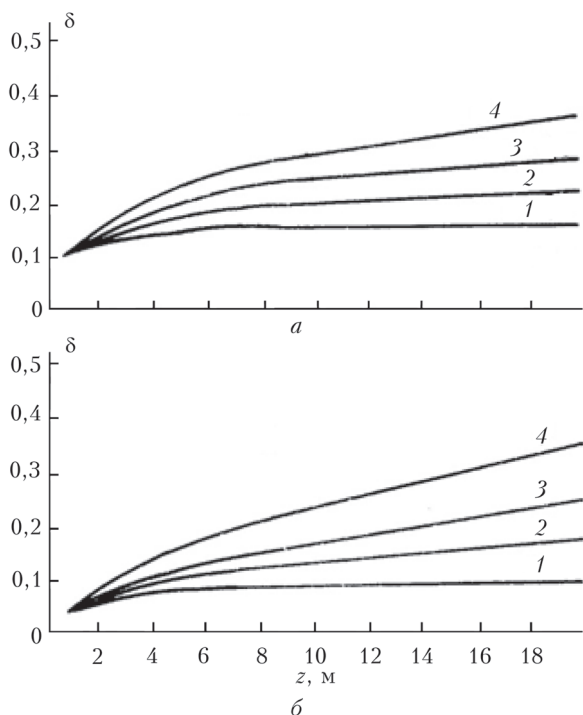


Рис. 6. Профили деполяризации в однородной воде с индикатрисами $g_2(\gamma)$ (а) и $g_1(\gamma)$ (б); надводная атмосфера сигналы не искажает; высота полета $H_0 = 200$ м, $\epsilon = 0,323$ м⁻¹, $\Lambda = 0,86$; кривые 1–4 соответствуют углам поля зрения $\theta = 1, 2, 4$ и 7 мрад

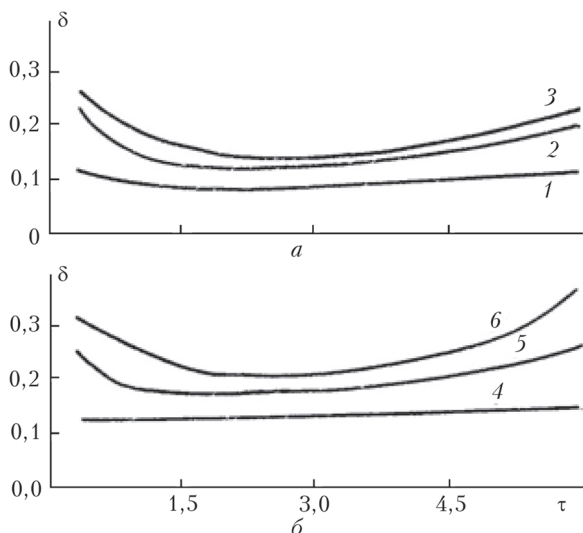


Рис. 7. Профили деполяризации в однородной воде; надводная атмосфера содержит несферические аэрозоли; $\Lambda = 0,835$; для индикатрисы $g_2(\gamma)$ кривые 1–3 соответствуют $\eta = 0,04; 0,12$ и $0,24$ (а); для $g_1(\gamma)$ кривые 4–6 соответствуют $\eta = 0,04; 0,12$ и $0,24$ (б)

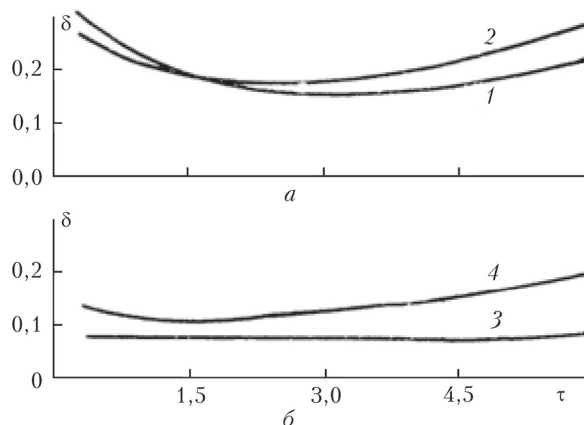


Рис. 8. Профили деполяризации в однородной воде; надводная атмосфера содержит несферические аэрозоли; для $\Lambda = 0,835$ и $\eta = 0,24$ кривые 1, 2 соответствуют индикатрисам $g_2(\gamma)$ и $g_1(\gamma)$ (а); для $\Lambda = 0,63$ и индикатрисы $g_1(\gamma)$ кривые 3, 4 соответствуют $\eta = 0,04; 0,12$ (б)

Как показывают расчеты, иная ситуация складывается, когда атмосфера над морем содержит несферические частицы (для моделирования взята экспериментальная матрица рассеяния света для кристаллов поваренной соли кубической формы). Излучение, однократно рассеянное на аэрозолях в приосевом направлении, частично деполяризуется, но из зондирующего нерассеянного луча не выводится, а наравне с ним участвует в формировании эхосигнала от гидрозолей. Следовательно, уже однократно рассеянное назад гидрозолями даже сферической формы излучение также частично деполяризовано. Это иллюстрирует рис. 7 (η характеризует долю многократного рассеяния).

Например, $\eta = 0,28$, если УПЗ $\theta = 7$ мрад, $H_0 = 200$ м и показатель рассеяния $\sigma = 0,2$ м⁻¹ или при угле расходимости лазерного излучения $\theta = 4$ мрад и $H_0 = 350$ м. На практике, увеличивая высоту полета, но уменьшая угол поля зрения, можно сохранить постоянной долю МКР (при постоянных параметрах воды). Оптическая толщина $\tau = \sigma z$. Высота полета особенного значения для этого эффекта не имеет. На рис. 8 сравнивается относительное влияние индикатрис (кривые 1 и 2) и η , но уже при меньшей вероятности выживания кванта (что характерно для биологически более продуктивных вод с повышенной концентрацией поглощающих излучение веществ). Для оценки влияния величины Λ кривые 3, 4 (рис. 8) сравним с кривыми 4, 5 (рис. 7). Из результатов сравнения следует, что при уменьшении вероятности выживания фотона Λ больше излучения поглощается водой, не участвует в процессах рассеяния и тем самым снижает абсолютное значение деполяризации.

Экспериментальные исследования однородной океанской воды проводились в контролируемых условиях одновременно двумя лидарами. Схема эксперимента приведена на рис. 9. Лидар «Светозар-3» с одним приемным телескопом и линейной поляризацией лазера был установлен на борту

НИС «Фритъоф Нансен» (организация «Севрыбпромразведка» г. Мурманск). Второй лидар «Макрель-2» находился на борту исследовательского самолета Ил-18ДОРР (организация «Севрыбпромразведка» г. Мурманск) [7]. Оптические схемы лидаров были идентичны. Чтобы обеспечить условия, близкие по уровню многократного рассеяния, у них варьировался угол поля зрения приемных телескопов. Параметр η , характеризующий долю многократного рассеяния в сигнале, поддерживался приблизительно равным для обоих лидаров.

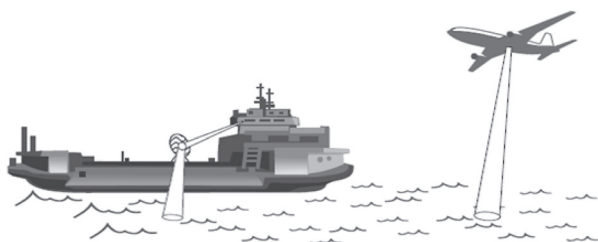


Рис. 9. Схема эксперимента по лазерному зондированию однородного слоя воды корабельным и самолетным лидарами

С борта судна производились измерения глубины видения белого диска z_B , температуры и солености воды; ее однородность контролировалась акустическим эхолотом. Самый распространенный и простой способ оценки оптических свойств воды – это оценка прозрачности с помощью стандартного белого диска диаметром 300 мм. Глубина его исчезновения называется условной прозрачностью воды [8]. Показатель рассеяния σ при этом определяется из соотношения

$$\sigma = 7,6z_B^{-1} - 0,04,$$

которое выполняется для $\lambda = 520\text{--}550$ нм с коэффициентом корреляции между σ и z_B^{-1} , равным 0,933, и среднеквадратическим отклонением 0,11. Если длина волны близка к 520 нм, то показатель ослабления имеет вид

$$\epsilon = 7,0z_B^{-1}.$$

На акватории размером около 50×50 км² с центром на $72^\circ 20'$ с.ш. и $22^\circ 00'$ в.д. (Баренцево море) судно выполнило 5 гидрографических станций. Наиболее удачной по погоде (для самолета) оказалась станция № 3. В этом районе самолет с работающим лидаром выполнил несколько галсов длиной до 30 км, проходивших на удалении $0,1 \div 10$ км от судна.

Неблагоприятные метеорологические условия – волнение до 5 баллов, низкая облачность – привели к разбросу измеренных значений z_B в пределах $25 \div 30$ м. Из классической литературы [9] известно, что днем погрешность измерения z_B при волнении порядка 4 баллов составляет ± 2 м. Для нашего случая это соответствует относительной погрешности $\delta z_B \approx 8\%$. Следовательно, перевычисление

по этим формулам дает $\sigma = (0,26 \div 0,21) \text{ м}^{-1}$ или $\epsilon = (0,28 \div 0,23) \text{ м}^{-1}$. Получаемые при этом оценки вероятности выживания фотона $\Lambda = \delta/\epsilon = 0,93 \div 0,91$ можно считать несколько завышенными для морской воды (исходя из литературных источников).

Обращение данных судового лидара (решение обратной задачи) показывает, что $\epsilon = (0,14 \pm 0,02) \text{ м}^{-1}$. Стандартное отклонение измеренных величин ϵ превосходит расчетные значения погрешностей. По измерениям самолетного лидара $\epsilon = (0,15 \pm 0,08) \text{ м}^{-1}$. Таким образом, средние значения у них совпадают, а разброс данных для авиационной схемы измерений гораздо больше. Здесь сказывается более высокая погрешность работы 6-разрядного самолетного АЦП по сравнению с 7-разрядным судовым, а также сильная флуктуационная составляющая в сигнале френелевского отражения от поверхности воды.

Обращает на себя внимание большое систематическое смещение (в $1,5 \div 2$ раза) лидарных значений ϵ от этой же величины, но оцененной традиционно, по глубине видения диска.

Гидрологические условия указанного района в период проведения эксперимента характеризовались однородным перемешиванием водных масс южного крыла течения Гольфстрим. Поверхностная температура воды по маршруту судна изменялась на десятые доли градуса; глубинные температуры по одному горизонту изменялись на сотые доли градуса. Как уже отмечалось, в большей части района эксперимента вода была однородной. Свойственные для нее профили деполяризации приведены на рис. 10. Их качественный вид с монотонным нарастанием абсолютного значения деполяризации хорошо совпадает с ранее полученными нами данными, например [10]. На участке трассы зондирования от поверхности моря до глубины несколько метров, где деполяризация уменьшается, весьма заметно влияние изначальной частичной деполяризации излучения лазера при его прохождении через надводную атмосферу.

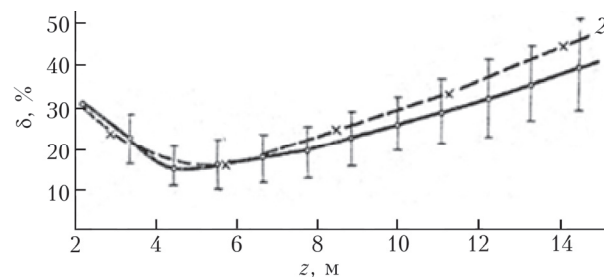


Рис. 10. Одновременные глубинные профили деполяризации для однородной морской воды: кривая 1 – судовый лидар; кривая 2 – самолетный

Эти эксперименты производились в Заполярье, в условиях практически постоянных кристаллических осадков. Даже при первичном рассеянии в направлении вперед это дифрагированное излучение частично деполяризуется и складывается с нерассеянной составляющей лазерного луча.

Итак, интерпретация данных одновременного поляризационного лидарного зондирования однородной морской акватории с борта самолета и судна с использованием методов Монте-Карло и малоуглового приближения позволяет сделать следующий вывод. Результаты зондирования однородной воды лидарами двух типов базирования дают близкие значения как по восстановленному показателю ослабления излучения, так и по профилю депolarизации. Это предполагает их хорошее взаимодополнение, возможность одновременного использования и взаимную редукцию данных обоих лидаров.

1. Шаманаев В.С. Самолетные лидары ИОА СО РАН для зондирования оптически плотных сред // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 3. С. 260–266; *Shamanev V.S. Airborne lidars of the IAO SB RAS for sensing of optically dense media // Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 4. P. 359–365.
2. *Дистанционный контроль* верхнего слоя океана / М.В. Кабанов (ред.). Новосибирск: Наука, 1991. 149 с.

3. *Иванов А.П. Физические основы гидрооптики.* Минск: Наука и техника, 1975. 504 с.
4. *Марчук Г.И., Назаралиев М.А., Дарбинян Р.А., Каргин Б.А., Елепов Б.С.* Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука, 1976. 284 с.
5. *Креков Г.М., Крекова М.М., Шаманаев В.С.* Численные оценки влияния атмосферы на формирование сигнала при зондировании морской воды // Оптика атмосф. и океана. 1992. Т. 5, № 11. С. 1208–1211.
6. *Кадьшев Е.А., Любовцева Ю.С., Розенберг Г.В.* Измерения матриц рассеяния света морской водой // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1971. Т. 7, № 5. С. 557–561.
7. *Пеннер И.Э., Шаманаев В.С.* Опыт совместного зондирования моря судовым и самолетным лидарами // Оптика атмосф. и океана. 1993. Т. 6, № 1. С. 107–111.
8. *Монин А.С., Красицкий В.П.* Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 376 с.
9. *Шифрин К.С.* Введение в оптику океана. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 278 с.
10. *Пеннер И.Э., Самохвалов И.В., Шаманаев В.С.* Оптическое зондирование морской фронтальной зоны // Оптика атмосф. и океана. 1988. Т. 1, № 12. С. 60–66.

V.S. Shamanev. Hydrooptical signals of an airborne polarization lidar for sensing the homogeneous sea water depth.

The special features of hydrooptical signals of an airborne polarization lidar are theoretically and experimentally analyzed in the case of sensing of homogeneous water mass under controllable conditions. The results obtained expand the possibilities of interpretation of lidar return signals, especially in complex and ambiguous situations. Results of theoretical and experimental investigations of the depth profiles of hydrooptical signals of airborne polarization lidars operated under conditions of homogeneous water depth are presented.