

И.Э. Пеннер, В.С. Шаманаев

ОПЫТ ОДНОВРЕМЕННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ МОРЯ СУДОВЫМ И САМОЛЕТНЫМ ЛИДАРАМИ

Выполнен эксперимент по одновременному зондированию моря лидарами с борта самолёта и судна. Гидрологический контроль выявил наличие локальной неоднородности солёности. Недалеко от этого места самолётный лидар зарегистрировал появление импульсов из-под воды с переменным состоянием поляризации на глубинах 10—15 м. В районах с однородной водой оба лидара дали близкие результаты как по показателю ослабления излучения, так и по профилю деполаризации.

Достаточно широкое использование лидаров для исследования морских акваторий ставит на очередь вопрос о сравнении результатов, полученных с помощью различных приборов. Однако надо отметить, что лидарные данные являются, по существу, косвенными, и в процессе решения обратной задачи зондирования на них влияют условия эксперимента, а именно: технические особенности лидаров, а так же светорассеивающие свойства водной массы [1–5].

Полномасштабное метрологическое сопоставление различных лидаров – весьма сложный и дорогостоящий эксперимент. Однако нельзя в настоящее время отказываться от проведения экспериментов, решающих такую задачу хотя бы частично.

Так, нами была предпринята попытка провести такое исследование совместно с управлением «Севрыбпромразведка» с использованием разработанных в ИОА лидаров. На самолете ИЛ-18ДОРР устанавливался лидар «Макрель» [6], оснащенный фотоумножителями ФЭУ-84-3. Для регистрации поляризационных компонентов сигнала обратного рассеяния применялся 2-канальный 6-разрядный аналого-цифровой преобразователь с временем квантования 25 нс. Зондирование моря осуществлялось в надир.

На научно-поисковом судне типа «Атлантик-733» был установлен лидар «Светозар-3» [6, 7], у которого в данной задаче использовался только один из трех приемных телескопов. Детектирование сигналов производилось фотоумножителями 28ЭЛУ-Ф15, а регистрация – многоканальным 7-разрядным АЦП с шагом квантования 10 нс. Лидар был размещен в каюте, а зондирование моря производилось через вынесенное за борт отклоняющее зеркало. Оно было сориентировано по отношению к плоскости поляризации излучения лазера так, чтобы его матрица отражения не искажала зондирующий и принимаемый импульсы излучения [7].

Показатель ослабления излучения восстанавливался по методу логарифмической производной:

$$\varepsilon = \frac{n}{2(z_2 - z_1)} \ln \frac{F(z_1) \left(H + \frac{z_1}{n}\right)^2}{F(z_2) \left(H + \frac{z_2}{n}\right)^2}, \quad (1)$$

где H – высота нахождения лидара над водой; $F(z)$ – мощность эхо-сигнала, приходящая из глубины z от поверхности воды; n – показатель преломления морской воды.

Решение вида (1) чувствительно к вкладу многократного рассеяния. Более того, в зависимости от условий эксперимента вычисляемая по (1) величина может быть ближе либо к показателю рассеяния, либо к показателю поглощения [8]. Поэтому чтобы для обоих лидаров поддерживались условия, близкие по многократному рассеянию, у них варьировался угол поля зрения. Параметр $\eta = H \varepsilon \theta$ (где θ – угол поля зрения), характеризующий долю многократного рассеяния в сигнале, поддерживался приблизительно равным для обоих лидаров.

С борта судна производились измерения глубины видения белого диска z_B , температуры и солености воды; ее однородность контролировалась акустическим эхолотом. Показатель рассеяния σ рассчитывался по [9] из регрессии

$$\sigma = 7,6 z_B^{-1} - 0,04 . \quad (2)$$

Она верна для диапазона длин волн 520–550 нм с коэффициентом корреляции σ и z_B^{-1} 0,933 и со среднеквадратическим отклонением $0,11 \text{ м}^{-1}$.

Для показателя ослабления действует иная взаимосвязь:

$$\varepsilon = 7,0 z_B^{-1} , \quad (3)$$

если длина волны близка к 520 нм [10].

На акватории размерами около $50 \times 50 \text{ км}^2$ с центром на $72^\circ 20' \text{ с. ш.}$ и $22^\circ 00' \text{ в. д.}$ судно выполнило 5 исследовательских станций. Наиболее удачной оказалась станция № 3. В этом районе самолет с работающим лидаром выполнил несколько галсов длиной до 30 км, проходивших на удалении $0,1 \div 10 \text{ км}$ от судна.

Неблагоприятные метеорологические условия – волнение до 5 баллов, низкая облачность – привели к разбросу измеренных значений z_B в пределах $25 \div 30 \text{ м}$. Из литературы [12] известно, что точность измерения z_B при волнении порядка 4 баллов составляет $\pm 2 \text{ м}$. Для нашего случая это соответствует относительной погрешности $\delta z_B \approx 8\%$. (При очень прозрачной воде сильно сказываются условия освещенности и физиологические особенности глаза).

Следовательно, перевычисление по (3) и (2) дает $\sigma = (0,26 \div 0,21) \text{ м}^{-1}$ или $\varepsilon = (0,28 \div 0,23) \text{ м}^{-1}$. Получаемые при этом оценки вероятности выживания фотона $\Lambda = \delta / \varepsilon = 0,93 \div 0,91$ можно считать завышенными для морской воды.

Обращение данных судового лидара показывает, что $\varepsilon = (0,14 \pm 0,02) \text{ м}^{-1}$. Стандартное отклонение измеренных величин ε превосходит расчетные значения погрешностей. По измерениям самолетного лидара $\varepsilon = (0,15 \pm 0,08) \text{ м}^{-1}$. 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 мощная 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. Это смещение совпадает по величине с опубликованными в [11] результатами, полученными шведскими учеными, когда измеренное независимыми контрольными приборами значение показателя рассеяния превосходит таковое, но полученное лидаром.

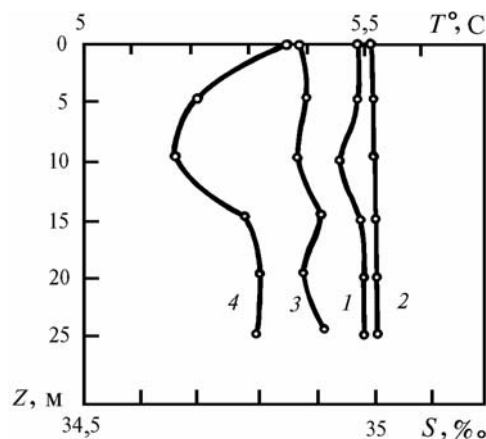


Рис. 1. Глубинное распределение температуры T (кривые 1 и 3) и солености S (кривые 2 и 4) моря. Кривые 1 и 2 – станция № 2, кривые 3 и 4 – станция № 3

Собственно гидрологические условия данного района в период проведения эксперимента характеризовались однородным перемешиванием водных масс южного крыла течения Гольфстрим. Поверхностная температура воды по маршруту судна изменялась на десятки доли градуса; глубинные температуры по одному горизонту изменялись на сотые доли градуса. Такого же порядка и изменения солёности. Так, на рис. 1 кривые 1 и 2 отражают глубинное изменение температуры и солёности на станции № 2.

Аналогичные почти постоянные по глубине профили были получены и на других станциях, исключая станцию № 3. Вблизи нее были локализованы профили для кривых 3 и 4. Такой скачок солёности называется галоклином [14], и по абсолютной величине он здесь составлял 0,13%. Данные акустической локации в этом месте показали, что в районе галоклина нет крупнодисперсных биологических или минеральных образований твердой консистенции. Верхний 5-метровый слой был стабильным, т.е. активно перемешанным за счет ветрового волнения. Интересно, что при переходе от станции № 3 к станции № 4 наблюдалось уменьшение глубины дна от 400 до 150 м. Возможно, этим и объясняется наличие локального скачка плотности, т.к. зоне резкого изменения глубины моря обычно соответствует наличие подводного течения.

Как уже отмечалось, в большей части района эксперимента вода была лишена неоднородностей. Свойственные для нее профили деполяризации приведены на рис. 2. Их качественный вид хорошо совпадает с ранее приведенными нами данными, например [13]. Правда, деполяризация для самолетного лидара возрастает несколько быстрее, что естественно, однако эта разница находится в пределах разброса экспериментальных данных.

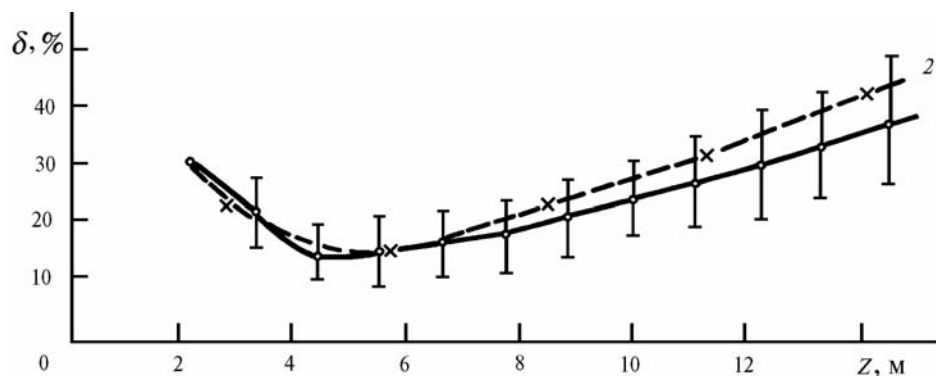


Рис. 2. Глубинные профили деполяризации для однородной водной массы. Кривая 1 – судового лидара; кривая 2 – самолетный

В районе нахождения локального галоклина на станции № 3 наблюдались всплески на подводной части эхосигналов самолетного лидара на глубинах 10÷15 м. (Судовой лидар находился несколько в стороне от полетных галсов и не регистрировал такие импульсы). Примерно для 70% таких сигналов подводные импульсы отмечались только на поляризованном компоненте сигнала; в 20% случаев – только на деполаризованном компоненте, и в 10% случаев – одновременно на обоих этих компонентах. Величина деполаризации сигнала в этом случае составляла 35÷40%. Процентное соотношение разного вида импульсов сохранялось при изменении высоты полета от 100 до 220 м.

В целом в галоклине число эхосигналов с подводными импульсами для самолетного лидара составляло 40% от общего количества сигналов.

Анализ физической природы появления таких импульсов с отличающимися состояниями поляризации может быть многообразным и не входит в тему данного сообщения. (Импульсы последствия фотоумножителей здесь исключены). Некоторые предпосылки к такому анализу были сделаны нами ранее [15].

По итогам работы можно сделать следующие выводы, хотя, как уже отмечалось, эксперимент нельзя считать проведенным полностью в запланированном объеме.

Во-первых, результаты зондирования однородной воды лидарами обоих типов базирования дают близкие значения как по показателю ослабления излучения, так и по деполариза-

ции. Это предполагает их хорошее взаимодополнение, одновременное использование, редукцию данных и т.п.

Во-вторых, интересный эффект проявился при зондировании локальной по океанским масштабам неоднородности в море. Сама эта неоднородность размерами около 30 км заявлена только некоторым повышением солености, без явных признаков компонентов иного фазового состава, чем вода. Этот галоклин повлиял на оптические характеристики воды еще более локально, т.к. судовой лидар не отметил оптические аномалии, а самолетный зарегистрировал, но в режиме выполнения галсов. И наконец, некая еще более мелкая структура с размерами в десятки и сотни метров, когда ее ячейки совершенно по-разному изменяют состояние поляризации лидарного сигнала из-под воды.

Все это внушает уверенность в необходимости продолжения подобных экспериментов, несмотря на их сложность и высокую стоимость.

1. Власов Д. В. //Изв. АН СССР. Сер. физ. 1986. Т. 50. № 4. С. 724–735.
2. Ногге F. E., Wright C. W., Krabill W. B. et al. //Appl. Opt. 1988. V. 27. № 19. P. 3369–3977.
3. Гольдин Ю. А., Евдошенко М. А. Исследования пространственной изменчивости гидрооптических характеристик во фронтальных зонах океана. М., 1986. 10 с. Деп. в ВИНТИ 24.02.86. № 1654–В86.
4. Пеннер И. Э., Самохвалов И. В., Шаманаев В. С. //Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 12. С. 60–66.
5. Зенченко С. А., Малевич И. А., Пранович В. И. и др. //Квантовая электроника. 1987. Т. 14. № 11. С. 2381–2384.
6. Абрамочкин А. И., Занин В. В., Пеннер И. Э. и др. //Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 2. С. 92–96.
7. Лазерное зондирование тропосферы и подстилающей поверхности /Под ред. В.Е. Зуева. Новосибирск: Наука, 1987. 262 с.
8. Дистанционный контроль верхнего слоя океана /Под ред. М.В. Кабанова. Новосибирск: Наука, 1991. 149 с.
9. Копелевич О. В., Шемшур В. К. //Океанология. 1988. Т. 23. № 5. С. 736–741.
10. Козлянинов М. В. //Океанология. 1980. Т. 20. № 2. С. 329–334.
11. Steinvall O., Klevebrant H., Lexander J., Widen A. //Appl. Opt. 1981. V. 20. № 19. P. 3284–3286.
12. Шифрин К. С. Введение в оптику океана. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 278 с.
13. Пеннер И. Э., Самохвалов И. В., Шаманаев В. С. //Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 12. С. 60–66.
14. Гилл А. Динамика атмосферы и океана. М.: Мир, 1986. Т. 1. С. 63–65.
15. Крекова М. М., Пеннер И. Э., Самохвалов И. В., Шаманаев В. С. //9 Всесоюз. Симп. По лазерному и акуст. зондированию атмосферы. Томск: ИОА, 1987. Ч. 1. С. 202–206.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
26 октября 1993 г.

I. E. Penner, V. S. Shamanaev. The Experiments on Simultaneously Sea Sounding Using Shipborne and Airborne Lidars.

The experiments were performed on simultaneous sea sounding using shipborne and airborne lidars. Hydrologic monitoring has revealed the presence of local inhomogeneity of salinity. Not far from this place the airborne lidar has recorded the appearance of pulsed from under the water with variable state of polarization at a depth of 10 to 15 m. In the regions with homogeneous water the both lidars gave similar results both on the radiation attenuation index and the depolarization profile.