

И.Э. Пеннер, И.В. Самохвалов, В.С. Шаманаев

ОПТИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ МОРСКОЙ ФРОНТАЛЬНОЙ ЗОНЫ

Проведен комплексный эксперимент, в котором по предварительно полученной карте радиационной температуры поверхности моря произведено лазерное зондирование. Лидар поляризационный, с длиной волны излучения 532 нм. Производилась оценка прозрачности воды, измерялась деполяризация эхо-сигнала до глубины 25 м, контролировалось наличие подводных гидрозольных образований. Отмечена взаимосвязь температуры поверхности моря в районе фронтальных разделов с количеством импульсных сигналов из-под воды и со стандартным отклонением показателя ослабления. Однако эта взаимосвязь сложная. Обнаружено, что состояние надводной атмосферы влияет на деполяризацию сигналов из-под воды.

Авиационные методы изучения океана обладают целым рядом положительных качеств. Сочетание самолета как носителя и лидара как средства дистанционного исследования открывает широкие перспективы как для прикладной, так и для фундаментальной науки. При этом регистрация принимаемого сигнала на длине волны зондирующего излучения подкупает своей аппаратной простотой. Уже имеется ряд публикаций по экспериментальным данным, полученным этим методом самолетными лидарами. Можно обсуждать реальность представленной в [1] глубины обнаружения дна или правильность интерпретации характера эхо-сигналов в [3], однако перспективность самого направления очевидна. Нами были продолжены начатые в [2] работы.

Лидар «Макрель-2» [4] представляет собой достаточно гибкий инструмент для проведения лазерного зондирования на длине волны $\lambda = 532$ нм (или 539,8 нм, в зависимости от модификации лазера), энергия импульса излучения 10 мДж, расходимость луча лазера 0,8 мрад. При диаметре приемного объектива 0,15 м и фокусном расстоянии 0,75 м угол его поля зрения можно изменять от 1,3 до 13,6 мрад. Это позволяет исследовать как верхние слои моря, так и атмосферные метеообразования. Дальнейшее увеличение поля зрения ограничено возможностями изготовления призмы Волластона большого размера (она используется как анализатор состояния линейной поляризации эхо-сигналов). В качестве фотодетекторов использованы ФЭУ-84-3 в режиме, когда у них ослаблено проявление импульсов последействия, возникающих после френелевского отражения луча лазера на границе раздела воздух — вода и соответствующей засветки фотокатода. Полуширина импульса ФЭУ, отраженного от плоской мишени, практически совпадала с длительностью импульса лазера, измеренной с помощью коаксиального фотоэлемента, и составляла 22–23 нс. Информационная система лидара построена на базе микро-ЭВМ и аналого-цифрового преобразователя с шагом квантования 25 нс и разрядностью 6 [5]. Данные о точностных характеристиках всего измерительного комплекса изложены в [6]. Сравнить лидар «Макрель-2» с другими лидарами авиационного базирования можно по работе [7].

Лидар совместно с другой аппаратурой размещался на борту самолета-лаборатории ИЛ-18 ДОРП Управления «Севрыбпромразведка» [8].

В ходе исследований проводилось зондирование верхнего слоя моря в районе температурных фронтов. Перед лидарным зондированием с помощью ИК радиометра (диапазон 8–12 мкм, погрешность измерения температуры 0,2°C) производилась термосъемка поверхности моря с целью установления конфигурации температурного поля.

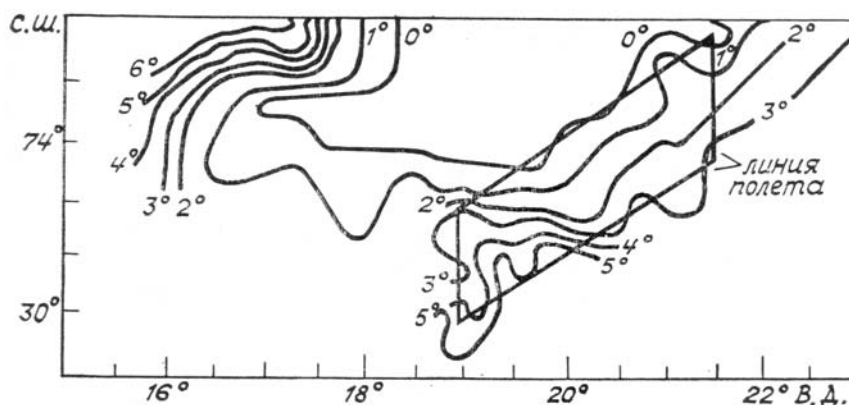


Рис. 1. Схема полета 23.11.87 г. Фигурные линии-изотермы на поверхности моря. Прямые — линии полета самолета-лаборатории

Ставились задачи оценить взаимосвязь температуры поверхности воды и измеренных лидаром показателя ослабления и поляризационных характеристик сигналов в глубоководной части моря, а также получить данные для планирования дальнейших экспериментов.

На основе предварительно полученных тепловых карт было выполнено два последовательных полета в Баренцевом море на удалении порядка 500 км от берега. Схема одного из полетов 23.11.87 г. приведена на рис. 1 ломаной линией. Частота вспышек лазера 5,6 Гц; скорость полета 100 м/с; угол поля зрения лидара 13 мрад; длина участков зондирования с курсами «0°–180°» 40 км–50 км. Волнение достигало 4–5 баллов, наблюдались барашки. Высота полета 200 м, глубина зондирования воды 10–30 м.

Для контроля состояния воды измерялись следующие ее параметры.

1. Параметр $\hat{\varepsilon}$ — полученная методом логарифмической производной средняя по зондируемой толще воды оценка показателя ослабления излучения в воде (причем заниженная многократным рассеянием света относительно истинного значения ε). Фактически значение $\hat{\varepsilon}$ представляет собой декремент затухания лидарного сигнала в воде в предположении его экспоненциального характера:

$$\hat{\varepsilon} = \frac{n}{2(z_2 - z_1)} \ln \frac{F_1(z_1)}{F_1(z_2)}, \quad (1)$$

где $F_1(z)$ — интенсивность поляризованного компонента сигнала на глубине z под водой; n — показатель преломления воды.

2. Профиль деполяризации эхо-сигнала на глубине z в воде:

$$Q(z) = F_2(z)/F_1(z), \quad (2)$$

где $F_2(z)$ — интенсивность деполяризованного компонента сигнала.

3. Относительная частота N появления на эхо-сигнале импульсов от подводных гидрозольных образований, т.е. доля эхо-сигналов, имеющих всплеск на заднем фронте, в общем количестве зондирующих импульсов в файле информационной системы лидара.

Отметим, что при вычислении $\hat{\varepsilon}$ специальный алгоритм отбирал только те эхо-сигналы, на заднем фронте которых отсутствовали импульсы от гидрозолей.

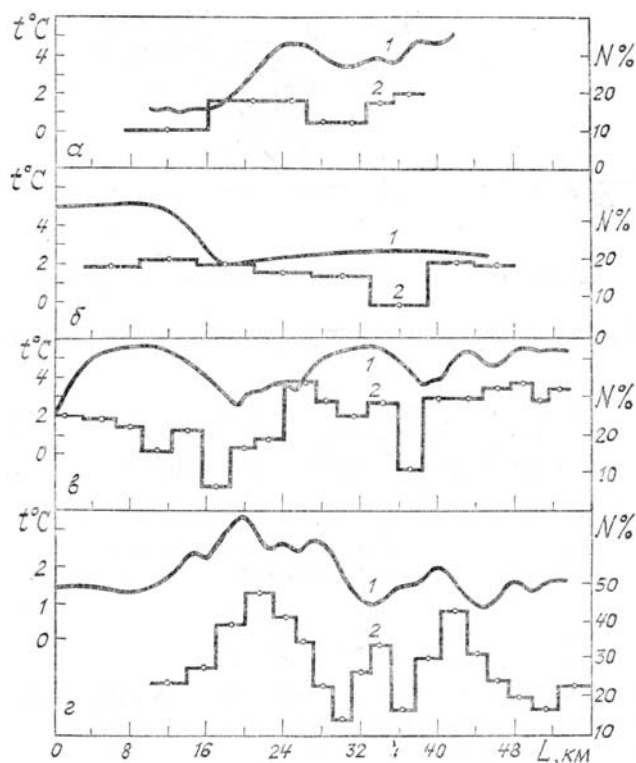


Рис. 2. Профили температуры поверхности воды t (1) и относительной частоты N (2) появления на эхо-сигналах импульсов от гидрозольных слоев вдоль нескольких полетных линий. L — расстояние от начала полетных линий

На рис. 2 приведены некоторые результаты для обоих летних экспериментов. Рис. 2, *a* соответствует галсу с курсом 180° по восточной долготе $18^\circ 10'$ (рис. 1). На гистограмме $N(L)$ каждый строб построен по файлу, содержащему от 70 до 150 вспышек лазера. Профиль $t(L)$ построен по практически непрерывным данным. Визуально на рисунке отмечаются сходные тенденции поведения функций $t(L)$ и $N(L)$. На рис. 2, *b* изображены данные, полученные по северному галсу с курсом 60° того же рис. 1. На профилях $t(L)$ и $N(L)$ имеются одиночные достаточно глубокие минимумы, однако они взаимно смещены по расстоянию L . Для рис. 2, *a* и 2, *b* измеренные значения оценок показателя ослабления $\hat{\epsilon}$ равны соответственно $(0,062 \pm 0,030) \text{ м}^{-1}$ и $(0,050 \pm 0,035) \text{ м}^{-1}$. То есть их стандартные отклонения $\delta \hat{\epsilon}$ составляют 48 и 70%. (Погрешность измерения $\hat{\epsilon}$ в данной ситуации оценивается в 10–15%). Это совпадает с отмечавшимся нами ранее явлением [9], когда $\delta \hat{\epsilon}$ в зонах температурных фронтов достигает 50–75%, а в температурно однородных зонах уменьшается до $\delta \hat{\epsilon} = 10–25\%$.

Данные, представленные на рис. 2, *в* и 2, *г* получены 25.11.87 г. в районе, отстоящем на один градус широты севернее, чем район измерений 23.11.87 г. (рис. 1). Схема полета показана на рис. 3. В статье рассмотрены результаты зондирования южным галсом с курсами 90° и 270° . Обе полетные прямые разнесены между собой на расстояние не более 20 км. Стандартные отклонения $\delta \hat{\epsilon}$ имеют значения около 60%. Визуальный анализ поведения профилей $t(L)$ и $N(L)$ также показывает наличие определенной коррелированности этих величин, причем она выглядит более явно, чем для предыдущего случая. Однако необходимо отметить, что коэффициент их взаимной корреляции q_{tN} не превосходит 0,55. Для сравнения нами были обработаны данные, приведенные в [10]. В этой работе рассмотрены полученные с использованием судового лидара горизонтальный профиль температуры воды (на глубине 6 м, а не на поверхности, как в нашем случае), и такой же профиль оценочного значения показателя поглощения воды k для излучения с $\lambda = 532 \text{ нм}$. В этих измерениях на дистанциях около 800 и 350 км нами были устранены линейные тренды и вычислены коэффициенты взаимной корреляции q_{tk} . В данном случае имелась антикорреляция на уровне, не превышающем $q_{tk} = -0,58$. Визуальный анализ также показывал сходство двух кривых. Но и для самолетных, и для судовых измерений линейная корреляция (или антикорреляция) лидарных и температурных данных невелика и не превосходит по модулю 0,6.

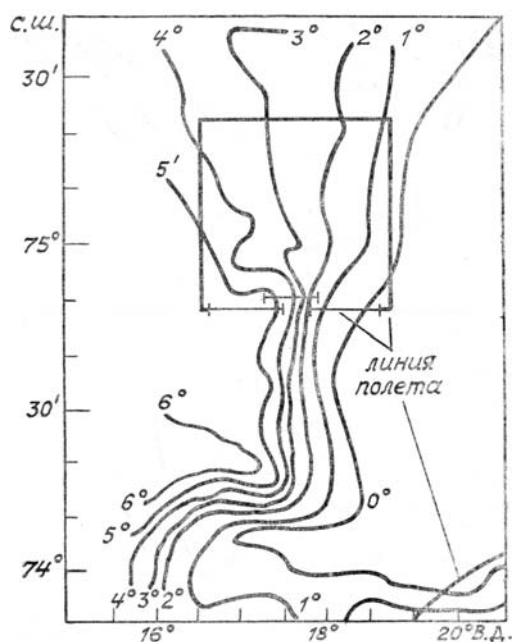


Рис. 3. Схема полета 25.11.87 г.

Известно, что градиенты температуры в воде, как и температурные инверсии в атмосфере, являются своеобразными ловушками для зоей различного происхождения. В открытом море вдали от берегов гидрзоли могут иметь только биологическое происхождение, т.е. это скорее всего фитопланктон. Из биологии моря известно, что фитопланктон скапливается именно в зоне температурных фронтов в море. По данным рис. 2, *a*, *в*, *г* и по другим, не приведенным в статье, видно возрастание количества импульсов от подводных гидрозольных образований на участках моря с относительно теплой водой. Это позволяет надеяться на достаточно надежное обнаружение зон повышенной био-

продуктивности моря в классе фитопланктона, причем на глубинах по крайней мере до 20–30 м, при одновременном использовании лидарных и ИК радиометрических данных.

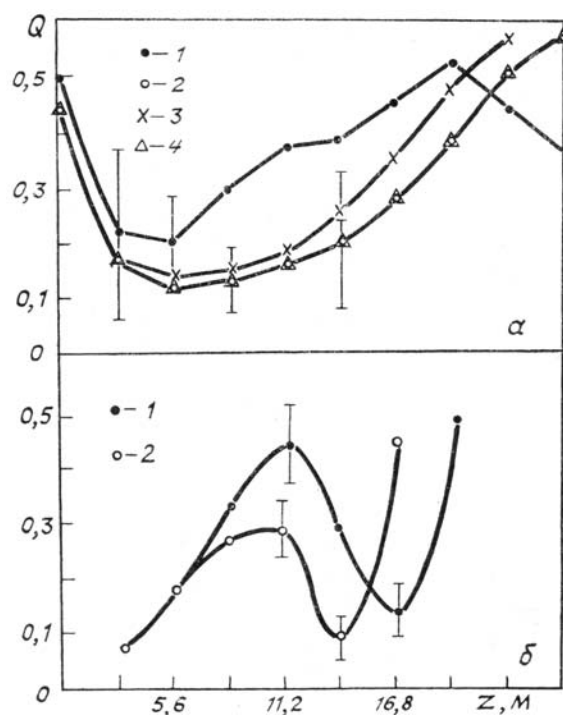


Рис. 4. Усредненные профили деполаризации в воде: *a* — сигналы не содержат всплесков на заднем фронте; *b* — сигналы имеют всплески на заднем фронте

Полезной для интерпретации данных зондирования оказывается информация о состоянии поляризации эхо-сигнала. Так, на рис. 4, *a* приведены усредненные глубинные профили деполаризации $Q(z)$, соответствующие рис. 2, *a*, с указанием стандартных отклонений. Они построены по сигналам, не содержащим подводных всплесков. Кривая 1 получена в начале полетной линии в относительно холодной воде. Кривые 2, 3 и 4 соответствуют удалению от начала линии на $L = 12, 20$ и 32 км и приходятся на более теплую водную массу. Видно, что на глубине 20–25 м Q возрастает до 50%, что значительно больше, чем, например, для такой плотной светорассеивающей среды, как облака.

Высокое значение деполаризации на границе воздух–вода (т.е. при $z = 0$) связано с рассеянием зондирующего излучения на неоднородностях микроволн на поверхности воды и подвержено из-за этого сильным флуктуациям. По нашим данным, в зависимости от состояния воды $Q(0)$ может менять значение от 0,04 до 0,6.

Интересен и такой факт, который иллюстрирует рис. 4, *a*. Можно сделать вывод, что абсолютные значения профиля деполаризации $Q(z)$ в воде зависят от состояния надводной атмосферы. Так, кривая 1 получена при наличии надводной дымки и атмосферных осадков в виде ледяных кристаллов. Кривые 2–4 соответствуют условиям более чистой надводной атмосферы. Проверка с использованием распределений Стьюдента и χ^2 показала, что средние части профилей деполаризации для кривых 1 и 2–4 отличаются друг от друга. На малых глубинах зондирования это различие замывается сильными флуктуациями $Q(0)$ на поверхности воды, а на больших глубинах — ошибками измерений. В других ситуациях, когда имелось ясное небо и слабая дымка, профили $Q(z)$ при сходных условиях эксперимента имели меньшие, чем на рис. 4, *a*, абсолютные значения. Наиболее вероятная причина зависимости деполаризации подводного сигнала от состояния надводной атмосферы — возникновение деполаризации в самом зондирующем луче вследствие рассеяния в направлении вперед на частицах аэрозолей.

По сигналам, содержащим всплески от подводных гидрозольных образований, построены профили $Q(z)$ (рис. 4, *b*). На глубине, соответствующей гидрозольному слою, т.е. всплеску на заднем фронте эхо-сигнала, наблюдается уменьшение значения деполаризации, которое происходит по двум основным причинам. Первая причина в том, что гидрозоль в слое состоит из оптически мягких сферических частиц, которые вызывают деполаризацию обратного рассеяния значительно меньше, чем остальная водная масса. Вторая — что в слое имеется пониженное значение вероятности выживания кванта, т.е. повышенное поглощение излучения. В этом случае рассеяние высоких кратностей будет сильнее поглощаться в слое, уменьшая тем самым общую деполаризацию эхо-сигнала. Не исключено и совместное действие этих механизмов.

Можно констатировать, что лидар, работающий на упругом рассеянии, позволяет начать в качественном плане удовлетворительные исследования динамических процессов в верхнем слое моря. Необходимо сосредоточить усилия на выявлении физических взаимосвязей между параметрами лидарных сигналов и характеристиками приповерхностного слоя морской воды; перейти к более точному количественному измерению оптических характеристик воды (как первый шаг в этом направлении можно рассматривать [11]); обязательно учесть влияние атмосферы при количественной интерпретации данных гидрооптического зондирования.

1. Аброскин А.Г., Бункин А.Ф., Власов Д.В. и др. // В кн.: Труды И О ФАН. Т. 1. Дистанционное зондирование океана. М.: Наука. 1986. С. 23–39.
2. Крекова М.М., Пеннер И.Э., Шаманаев В.С. // В кн.: 8 Всес. симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Ч. 1. (Тезисы докл.). Томск. 1984. С. 222–224.
3. Зенченко С.А., Малевич И.А., Пранович В.И. и др. // Квантовая электроника. 1987. Т. 14. № 11. С. 2381–2384.
4. Абрамочкин А.И., Занин В.В., Пеннер И.Э. и др. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 2. С. 92–96.
5. Бурков В.В., Надеев А.И., Пеннер И.Э., Шаманаев В.С. // В кн.: Труды 9 Всес. симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Ч. 1. Томск. 1987. С. 302–305.
6. Шаманаев В.С., Пеннер И.Э. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 8. С. 84–90.
7. Самохвалов И.В., Шаманаев В.С. Самолётные лидары и их применение. Деп. в ВИНТИ. № 2403-B88.
8. Орлов В.И. // Вокруг света. 1986. № 3. С. 6–8.
9. Крекова М.М., Пеннер И.Э., Самохвалов И.В., Шаманаев В.С. // В кн.: Труды 9 Всес. симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Ч. 1. Томск. 1987. С. 202–206.
10. Гольдин Ю.А., Евдошенко М.А. Исследования пространственной изменчивости гидрооптических характеристик во фронтальных зонах океана. Деп. в ВИНТИ. № 1654-B86.
11. Шаманаев В.С., Пеннер И.Э. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 7. С. 110–116.

Институт оптики атмосферы
СО АН СССР, Томск

Поступила в редакцию
2 сентября 1988 г.

I. E. Penner, I. V. Samokhvalov, V. S. Shamanaev. Hydrooptical Sounding of Sea-Water Frontal Zone.

The sea-water transparency and the laser depolarization ratio up to 25 deep were estimated from airborne lidar data. The seasurface temperature was found to be in a complex relationship with the presence of the underwater hydrosol layers and the variance of the extinction index.

The depolarization ratio proved to be dependent on the atmospheric conditions over the probed sea surface.