

Е.В. Баулин, Т.А. Гоголинская, П.В. Голубцов,
С.В. Пацаева, М.Л. Сердобольская, В.В. Фадеев,
Е.М. Филиппова

ДИСТАНЦИОННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И СОЛЕННОСТИ МОРСКОЙ ВОДЫ ПО СПЕКТРАМ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ

Применение метода математической редукции позволило повысить точность определения температуры и солености морской воды по спектрам комбинационного рассеяния. В работе обсуждается возможность учета наличия дисперсии показателя ослабления света при дистанционном лазерном зондировании заглубленных слоев морской воды.

Методы дистанционного лазерного зондирования, основанные на спектральном анализе эхо-сигнала, все более широко применяются для получения экспресс-информации о характеристиках морской среды.

Метод дистанционного определения температуры по спектрам комбинационного рассеяния (КР) жидкой воды был предложен в работе [1]. Этот метод основывается на зависимости от температуры величины параметра, равного отношению интенсивностей валентной полосы спектра КР воды на двух фиксированных длинах волн. Данный метод, который авторы назвали «двухцветным», дает хорошие результаты в лабораторных условиях и при измерении температуры приповерхностного слоя морской воды. Зондирование на большие глубины приводит к сильному искажению спектра из-за различия показателя ослабления рассеянного излучения ϵ_i для разных длин волн λ_i . Другой фактор — наличие в воде растворенных ионов — также приводит к искажению формы спектра КР воды и влияет на точность определения температуры воды в природных условиях.

В работе [2] были проведены оценки влияния дисперсии показателя ослабления света на результаты измерения температуры по спектрам КР. Значения температуры на трех глубинах, вычисленные по спектрам КР, оказались отличными от измеренных контактным способом. Для приведения данных в соответствие потребовалось ввести дифференциальный коэффициент ослабления, равный $0,003 \text{ м}^{-1}/\text{нм}$. Это число удовлетворительно согласуется с данными независимых измерений дифференциального ослабления света для типичных океанских вод в данном спектральном диапазоне. Таким образом, для точных измерений температуры морской воды по спектрам КР необходим учет дисперсии показателя ослабления света в пределах анализируемого спектрального интервала.

В этой же работе предлагается другой метод определения температуры морской воды — «поляризационный», в котором температура определяется по степени деполяризации спектра. Оценки авторов [2] показывают, что погрешность определения температуры или солености морской воды при наличии дисперсии показателя ослабления поляризационным методом будет на порядок меньше, чем «двухцветным», поскольку коэффициент деполяризации света морской средой много меньше, чем коэффициент ослабления света.

В работе [3] сообщается о проведении измерений температуры приповерхностного слоя воды «двухцветным» методом с погрешностью 1°C и поляризационным методом с глубины 45 м с погрешностью 1°C . Однако авторы не приводят данных о числе проведенных измерений температуры по спектрам КР и об учете влияния солености на результаты измерения температуры морской воды. В работе [3] в поляризационной методике используется отношение интегральных интенсивностей поляризованного и деполяризованного спектров КР воды, а в работе [4] — отношение интегральных интенсивностей компонент спектра КР правой и левой поляризации при возбуждении спектров КР излучением круговой поляризации. Считается, что круговая поляризация предпочтительнее, так как в этом случае выше степень деполяризации излучения.

Отметим, что в работах группы Леонарда [1–4] по спектрам КР воды определяется только температура воды или ее соленость при известном значении температуры.

В нашей лаборатории был предложен метод одновременного определения двух параметров морской воды — температуры T и солености S — по спектрам комбинационного рассеяния. Было разработано несколько вариантов метода одновременного определения T и S воды: «трехчастотная» методика, «многочастотная» и с применением метода редукции.

«Трехчастотная» методика описана в работе [5]. В этой работе параметры валентной полосы

$$\chi_{i,j} = I(\nu_i)/I(\nu_j), \quad i = 3, \quad j = 1, 2$$

определялись по трем значениям интенсивности валентной полосы КР воды (рис. 1). Частоты $\nu_{i,j}$ выбирались по особым точкам производной спектра. Возможность определения T и S по спектрам КР

воды основана на зависимости формы валентной полосы КР воды от этих двух параметров, причем зависимость от T и S различна. На рис. 2 показана зависимость формы валентной полосы КР дистиллированной воды от температуры. Разлагая функцию $\chi_{i,j}(T, S)$ от двух параметров в ряд Тейлора в окрестности некоторой точки (T_0, S_0) , получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \Delta\chi_{32} = \chi_{32} - \chi_{32}|_{T_0, S_0} = \left(\frac{\partial\chi_{32}}{\partial T}\right)_{T_0, S_0} \Delta T + \left(\frac{\partial\chi_{32}}{\partial S}\right)_{T_0, S_0} \Delta S + \dots \\ \Delta\chi_{31} = \chi_{31} - \chi_{31}|_{T_0, S_0} = \left(\frac{\partial\chi_{31}}{\partial T}\right)_{T_0, S_0} \Delta T + \left(\frac{\partial\chi_{31}}{\partial S}\right)_{T_0, S_0} \Delta S + \dots \end{cases}$$

Оставляя какое-то число членов и решая систему относительно $\Delta T = T - T_0$ и $\Delta S = S - S_0$, можно определить T и S водной среды.

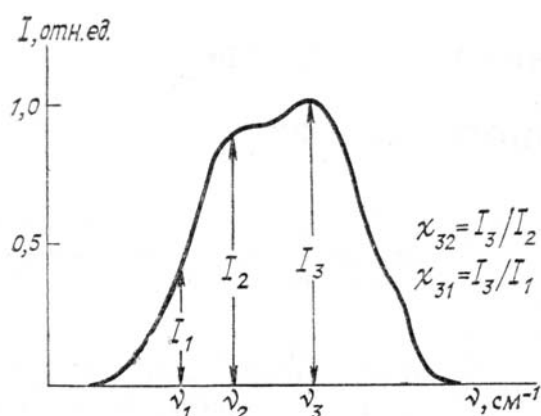


Рис. 1. Валентная полоса КР воды. Показаны частоты для «трехканального» метода одновременного определения температуры и солености

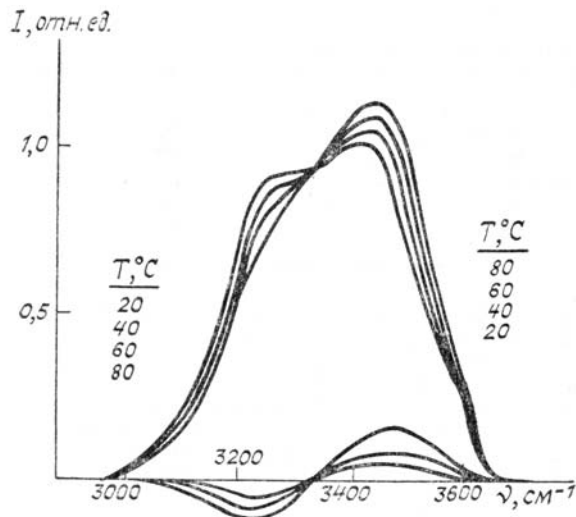


Рис. 2. Температурная зависимость валентной полосы КР дистиллированной воды

Для экспериментальной проверки метода одновременного определения T и S спектры КР воды мы получали при возбуждении излучением импульсного ИАГ: Nd^{3+} -лазера с удвоением частоты ($\lambda_0 = 532$ нм) или непрерывного аргонового лазера ($\lambda_0 = 488$ нм или 514,5 нм). Спектры КР регистрировались оптическим многоканальным анализатором (ОМА) в режиме параллельного детектирования.

В двух следующих вариантах метода одновременного определения температуры и солености морской воды используется информация о сигнале комбинационного рассеяния, накопленная во всех 500 каналах ОМА. Возможность математической обработки 500 точек спектра мы получили, благодаря применению микро-ЭВМ, состыкованной с ОМА.

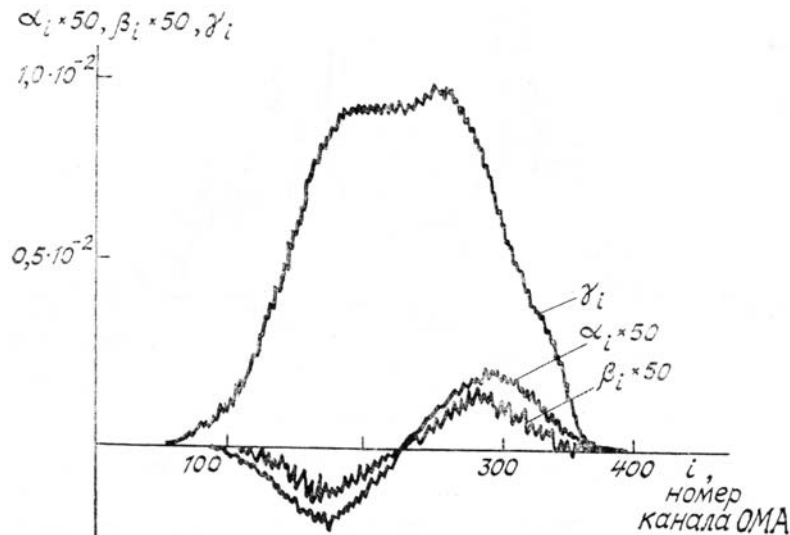


Рис. 3. Коэффициенты α_i , β_i , γ_i зависимости интенсивности спектра, нормированного к единице по площади, от температуры и солености воды

«Многочастотная» методика основывается на линейной зависимости от температуры и солености воды интенсивности спектра, нормированного к единице по площади, в каждом спектральном канале ОМА:

$$I_i = \alpha_i T + \beta_i S + \gamma_i,$$

где I — номер спектрального канала ОМА; α_i , β_i — коэффициенты, определяющие влияние T и S на спектр КР воды в i -м канале, γ_i — постоянная составляющая. Коэффициенты α_i , β_i , γ_i приведены на рис. 3.

Определение параметров T и S представляет собой задачу на нахождение минимума выражения

$$Q = \sum_{i=1}^{500} (I_i^{\text{иск}} - \alpha_i T - \beta_i S - \gamma_i)^2,$$

где $I_i^{\text{иск}}$ — интенсивность в i -м канале спектра КР воды и искомыми параметрами T и S . Минимизируя Q по T и S , получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{500} I_i^{\text{иск}} \alpha_i - T \sum_{i=1}^{500} \alpha_i^2 - S \sum_{i=1}^{500} \alpha_i \beta_i - \sum_{i=1}^{500} \alpha_i \gamma_i = 0 \\ \sum_{i=1}^{500} I_i^{\text{иск}} \beta_i - T \sum_{i=1}^{500} \alpha_i \beta_i - S \sum_{i=1}^{500} \beta_i^2 - \sum_{i=1}^{500} \beta_i \gamma_i = 0 \end{cases}$$

Решая систему двух линейных относительно T и S уравнений, получаем оценки T и S .

Проверка многочастотной методики проводилась на пробах, приготовленных из «нормальной» морской воды, калиброванно разбавляемых дистиллированной водой, в диапазонах температуры 20 ... 80°C и солености 0 ... 35‰. Часть из полученных спектров использовалась в качестве калибровочных для определения α_i , β_i , γ_i остальные — для определения T и S воды. Отклонения вычисленных температуры и солености воды от измеренных контактным способом, усредненные по серии из 30 спектров, составили в лабораторных условиях: $\Delta T = \pm 0,4^\circ\text{C}$, $\Delta S = \pm 0,5\%$ [6].

Однако многочастотный метод одновременного определения T и S в том виде, в котором он описан выше, не учитывает некоторых факторов, позволяющих повысить точность измерения температуры и солености, например, априорной информации об интервалах изменения параметров, о статистике шумов. Эти факторы позволяют учесть в вычислениях способ определения T и S , основанный на методе редукции [7].

Метод редукции — сравнительно новый математический метод решения обратных задач, позволяющий оптимизировать процесс измерения и обработки информации с целью получения минимальных погрешностей определения выбранных параметров объекта.

В методе редукиции используется следующая модель измерения [6]. Считается, что измеряемая величина ξ_i (в качестве ξ_i берется интенсивность спектра, нормированного к единице по площади, на частоте ν_i) линейно связана с температурой и соленостью воды,

$$\xi_i = \alpha_i T + \beta_i S + \gamma_i + \sigma_i, \quad (1)$$

где i — номер спектрального канала ОМА, $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ — параметры измерения; σ_i — случайная погрешность с нулевым средним и известной дисперсией. На рис. 4 показан спектр σ_i^2 . Коэффициенты $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ в методе редукиции имеют тот же смысл, что и в многочастотном методе.

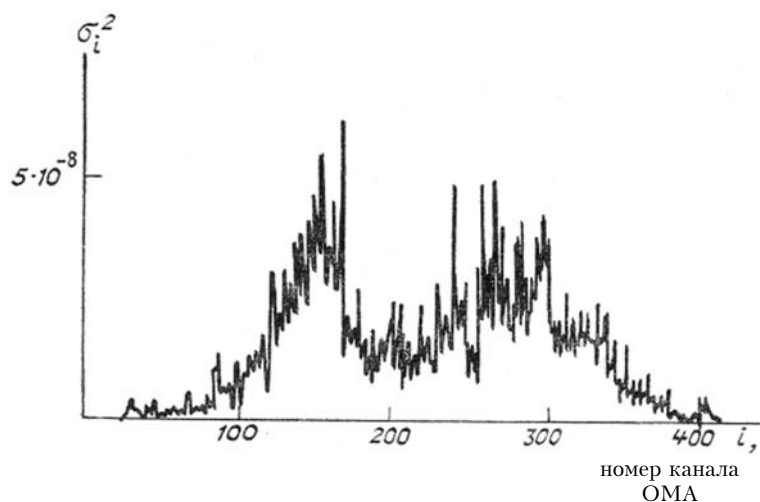


Рис. 4. Спектр квадратичного шума σ_i^2

Поскольку параметры модели неизвестны, проводится также серия калибровочных измерений спектров с известными температурой и соленостью воды:

$$\psi_i^j = \alpha_i T^j + \beta_i S^j + \gamma_i + \sigma_i^j,$$

где j — номер калибровочного спектра. Далее, по результатам калибровочных измерений и имеющейся априорной информации об интервалах изменения температуры и солености строится оптимальный редукиционный оператор, преобразующий результат измерения ξ_i в оценку T и S .

Т а б л и ц а

$T_0, ^\circ\text{C}$	$\sigma T_0, ^\circ\text{C}$	Оценка $T_p, ^\circ\text{C}$	$T_p - T_{\text{ист}}, ^\circ\text{C}$
30	100	22,4	-0,2
30	10	26,1	2,5
30	5	27,4	3,8
25	5	24,2	1,6
20	5	20,9	-1,7
23	2	22,6	0,0

Для иллюстрации зависимости результатов измерения с помощью метода редукиции от точности априорной информации мы получили оценки по методу редукиции температуры T_p для пробы морской воды (22,6 $^\circ\text{C}$, 7‰) при различной априорной информации о величине температуры T_0 и ее отклонении от истинного значения $T_{\text{ист}}$ (22,6 $^\circ\text{C}$) — σT_0 .

Из таблицы видно, что чем ближе к истинной наша априорная информация, тем меньше будет ошибка определения температуры. При этом важно, чтобы $T_{\text{ист}}$ попадала в интервал $T_0 \pm \sigma T_0$, иначе ошибка определения температуры возрастает, как это показано в третьей строке таблицы.

В настоящей работе рассматривается возможность обобщения метода одновременного определения температуры и солености морской воды на случай, когда дисперсией гидрооптических характеристик пренебречь нельзя, что, строго говоря, имеет место всегда при дистанционном зондировании естественных водных сред.

При дистанционном зондировании в натуральных условиях сигнал комбинационного рассеяния, принимаемый с глубины z , будет зависеть от экспоненциального множителя $e^{-(\varepsilon_0 + \varepsilon_i)z}$, где ε_i и ε_0 — показатели ослабления света на λ_i и длине волны возбуждения λ_0 . Предположим, что показатель ослабления света ε_i можно описать линейной пол λ_i функцией на участке спектра, содержащем полосу КР воды:

$$\varepsilon_i = \varepsilon^*(\lambda^*) + \frac{d\varepsilon}{d\lambda}(\lambda_i - \lambda^*) = \varepsilon^* + \frac{d\varepsilon}{d\lambda} \cdot \Delta\lambda_i,$$

а экспоненциальный множитель можно линеаризовать

$$e^{-\varepsilon_i z} = e^{-\varepsilon^* z} \cdot e^{-\kappa \Delta\lambda_i} \simeq e^{-\varepsilon^* z} (1 - \kappa \Delta\lambda_i),$$

где $\kappa = \frac{d\varepsilon}{d\lambda} \cdot z$. Тогда при нормировке спектра к единице по площади мы исключим постоянные множители, не зависящие от λ_i и получим следующую модель измерения:

$$\xi_i = (1 - \kappa \Delta\lambda_i) (\alpha_i T + \beta_i S + \gamma_i) + \sigma_i \quad (2)$$

с тремя неизвестными параметрами T , S и κ , причем в модель редукции входят произведения этих величин, то есть редукция нелинейна.

Для решения данной задачи (определения T и S при неизвестном κ) можно предложить два подхода. Первый состоит в сведении нелинейной редукции к линейной с тремя неизвестными параметрами. Второй позволяет выбрать такую оценку $\kappa(\tilde{\kappa})$, при которой погрешность определения T и S будет минимальной, но при этом оценка $\tilde{\kappa}$ может быть далека от истинного значения κ .

Пусть у нас имеется априорная информация о T_0 , S_0 . Тогда (2) можно записать в виде

$$\xi_i = \alpha_i T + \beta_i S + \gamma_i + \delta_i \kappa + \sigma_i, \quad (3)$$

где $\delta_i = -\Delta\lambda_i \alpha_i T_0 - \Delta\lambda_i \beta_i S_0 - \Delta\lambda_i \gamma_i$. При этом мы пренебрегли величиной $\Delta\lambda_i \alpha_i (T - T_0) + \Delta\lambda_i \beta_i (S - S_0)$, поскольку $\gamma_i \gg \alpha_i, \beta_i, T > (T - T_0), S > (S - S_0)$.

Модель редукции (3) является линейной по трем неизвестным параметрам T , S и κ , следовательно, аналогично модели (1) мы можем определить T , S и $\frac{d\varepsilon}{d\lambda}$ по спектру КР воды. Заметим, что в случае определения трех параметров погрешности будут больше, чем в случае определения только температуры и солености. Погрешности определения T и S в этом случае также будут зависеть от качества априорной информации.

Существует и другой подход для определения T и S в случае модели измерения (3). Мы оцениваем параметр κ , подставляем оценку κ с наибольшим значением надежности редукции (надежности гипотезы о том, что погрешность редукции меньше некоторого заданного числа η_0^2 [8]) в модель редукции и вычисляем T и S . Тогда среднеквадратическая погрешность определения T и S не будет превосходить η_0^2 . Заметим, что в данном случае мы не ставим цель определить величину κ , а ищем такую оценку $\tilde{\kappa}$, при которой погрешность определения T и S будет минимальной.

Рассмотренные нами методы позволяют учитывать наличие дисперсии показателя ослабления света в морской среде и определять характеристики морской воды — температуру, соленость по спектрам КР воды. Отметим, что во всех подходах важна не столько сама величина дисперсии показателя ослабления, сколько ее неконтролируемые изменения для различных вод.

1. Leonard D.A., Chang C.H., Yuong L.A. //U. S. Patent 3.986.775. 26 Dec. 1974. Class 356-75.
2. Leonard D.A., Caputo B., Hoge F.E. //Appl. Optics. 1979. V. 18. № 11. P. 1732–1745.
3. Leonard D.A., Caputo B., Guagliardo J.L., Hoge F.E. //Pr. SPIE. 1979. V. 208. P. 198–205.
4. Chang C.H., Young L.A. //In Proc. of conference «The Use of Lasers for Hydrographic Studies». NASA. SP-375. 1975. P. 105–112.
5. Беккиев А.Ю., Гоголинская Т.А., Фадеев В.В. //Доклады АН СССР. 1983. Т. 271. № 4. С. 849–853.
6. Гоголинская Т.А. Структура валентной полосы 3000...3700 см⁻¹ комбинационного рассеяния жидкой воды и ее использование для диагностики морской среды. Дис. ...канд. физ.-мат. наук. М.: Изд-во МГУ. 1987. 144 с.
7. Голубцов П.В., Пытьев Ю.П., Чуличков А.И. //В кн: V Всес. симпозиум по модульным информационно-вычислительным системам. Кишинев. 1985 С. 245.
8. Пытьев Ю.П. //Вестник МГУ. Сер. 3. Физика. Астрономия. 1986. Т. 27. С. 14.

E. V. Baulin, T. A. Gogolinskaya, P. V. Golubtsov, S. V. Patsayeva,
M. L. Serdobolskaya, V. V. Fadeev, E. M. Philippova. **Sea Water Temperature and Salinity
Remote Measurements from Raman Spectra.**

Sea water temperature and salinity were determined from Raman spectra. The measurement accuracy was improved due to the use of a reduction procedure. The problem of accounting for the variance of the attenuation coefficient in the laser remote sounding of the deep sea water layers is discussed.