

УДК 535.361

С. БАБИЧЕНКО, М. ПРАХОВ

## МНОВОВОЛНОВОЕ ЛАЗЕРНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ТЕРРИГЕННОГО ГИДРОЗОЛЯ

S. BABITSENKO, M. PRAKHOV. TERRIGEENSE HÜDROSOOLI MITMELAINELINE LASERSON-  
DEERIMINE

S. BABITCHENKO and M. PRAKHOV. MULTIPLE-WAVELENGTH LASER SENSING OF TERRIGE-  
NOUS HYDROSOL

(Представил Г. Лийдвя)

Одной из важнейших задач оптики океана является определение параметров взвеси, содержащейся в морской воде. Гидрозо́ль представляет собой смесь двух компонент — биогенной (крупные частицы размером от единиц до десятков микрон с относительным показателем преломления  $m=1,02-1,05$ ) и терригенной (размеры менее 1 мкм и  $m=1,13-1,25$ ) [1]. Для определения функции распределения частиц по размерам или ее параметров разработан ряд оптических методов: метод спектральной прозрачности, полной индикатрисы, подбора [2], которые являются лабораторными, требуют большого числа измерений и не позволяют, таким образом, оперативно определять параметры взвеси *in situ*. Во многих практических случаях достаточно знать лишь интегральные физические и оптические характеристики морского гидрозо́ля (среднее сечение частиц, объем, концентрацию и коэффициенты ослабления  $\alpha$  и обратного рассеяния  $\beta_r$ ).

В настоящей работе представлены результаты дистанционного определения параметров терригенной взвеси методом мнововолнового лазерного зондирования. Данные обработаны с помощью метода моментов функции распределения [3].

Измерения выполнены с помощью мнововолнового морского лидара (СКБ АН ЭССР) [4] с борта НИС АН ЭССР «Арнольд Веймер» (18-й рейс, август 1987 г., Балтийское море, пролив Соэла-Вяйн). В случае моностатической коаксиальной схемы накоплением по 100 импульсам измерялась интегральная по глубине  $R_g=15$  м энергия рассеянного назад излучения на длинах волн зондирования 435, 460, 475, 495, 520 нм, нормированная на энергию исходного импульса с учетом спектральной чувствительности приемного тракта. Значения сигналов обратного рассеяния и их среднеквадратичные отклонения получены усреднением 9—10 измерений. При интерпретации данных зондирования использовалась информация о поглощении «желтого вещества» ( $\kappa_{ж}^0(390 \text{ нм})=0,43-0,6 \text{ м}^{-1}$ ), о концентрации хлорофилла  $a$  ( $C_{хл} = 2,74 \text{ мг/л}$ ) и об интенсивности флуоресценции хлорофилла на длине волны 685 нм в зависимости от длины волны возбуждения, что позволило оценить вклад этих составляющих морской воды в полное ослабление излучения [5].

Для обработки данных зондирования сделаны следующие предположения: а) сигнал обратного рассеяния формируется за счет однократного рассеяния; б) частицы терригенного гидрозольа — однородные сферические частицы с показателем преломления  $m=1,15$ ; в) вкладом биогенной взвеси и чистой морской воды в сигнал обратного рассеяния пренебрегают [1, 2]; г) спектральный ход коэффициента ослабления биогенной взвеси нейтрален [1, 2]; д) зондируемый слой воды однороден по микрофизическим и оптическим характеристикам; е) ослаблением излучения в воздухе пренебрегают. В силу этих предположений уравнение лазерной локации имеет вид:

$$P(z, \lambda_i) = P_0(\lambda_i) A \frac{c\tau_{ii}}{2} \frac{\beta_{\pi}(\lambda_i)}{n^2(R_0+z/n)^2} \exp\{-2z\alpha(\lambda_i)\}, \quad (1)$$

где  $i=1, \dots, I$ ;  $I$  — число длин волн зондирования;  $P(z, \lambda_i)$  — мощность принятого с глубины  $0 < z < R_g$  сигнала обратного рассеяния;  $R_0$  — расстояние от излучателя до поверхности воды;  $R_g$  — глубина зондирования;  $P_0(\lambda_i)$  — мощность импульса зондирования;  $\tau_{ii}$  — его длительность;  $A$  — аппаратная константа лидара, м<sup>2</sup>;  $\beta_{\pi}(\lambda_i) = \beta_{\pi_p}(\lambda_i) + \beta_{\pi_t}(\lambda_i)$  — объемный коэффициент обратного рассеяния;  $\alpha(\lambda_i) = \alpha_p(\lambda_i) + \alpha_t(\lambda_i) + \alpha_b(\lambda_i) + \kappa_{ж}(\lambda_i) + \kappa_{хл}(\lambda_i) + \kappa_{в}(\lambda_i)$  — объемный коэффициент ослабления;  $\kappa$  — объемный коэффициент поглощения;  $n$  — показатель преломления воды (индексы р, т, б, ж, хл, в относятся к релейским частицам, терригенной и биогенной взвеси, «желтому веществу», хлорофиллу  $a$  и чистой морской воде соответственно).

Измеряемая энергия рассеянного назад излучения определялась как

$$E(\lambda_i) = \int_0^{R_g} P(z', \lambda_i) dz'. \quad (2)$$

По теореме о среднем вместо (2) можно записать

$$U(\lambda_i) = \beta_{\pi}(\lambda_i) \frac{R_g}{(nR_0+R_*)^2} \exp\{-2\alpha(\lambda_i)R_*\}, \quad (3)$$

где  $U(\lambda_i) = E/[AP_0(\lambda_i)c\tau_{ii}/2]$ ,  $R_* \in [0, R_g]$ . Интегрируя (2), нетрудно показать, что  $0 < R_* < \sqrt{nR_0(nR_0+R_g)} - nR_0$ . В эксперименте  $R_0 = 10$  м,  $R_g = 15$  м, тогда при  $\alpha \sim 0,1-1,0$  м<sup>-1</sup> получим  $R_* \sim 3-5$  м. В расчетах выбрано  $R_* = 4$  м. В эксперименте не определялась аппаратная константа  $A$ , поэтому принимаемый сигнал измерялся в относительных единицах. Система лидарных уравнений для отношения измеренных сигналов имеет вид:

$$S_i/S_1 = [\beta_{\pi_t}(\lambda_i) + \beta_{\pi_p}(\lambda_i)] / [\beta_{\pi_t}(\lambda_1) + \beta_{\pi_p}(\lambda_1)] \times \\ \times \exp\{2R_*[\alpha_t(\lambda_1) - \alpha_t(\lambda_i) + \alpha_p(\lambda_1) - \alpha_p(\lambda_i)]\}, \quad (4)$$

где  $S_i(\lambda_i) = U(\lambda_i)R^{-1}(nR_0+R_0)^2 \exp\{2R_*(\alpha_{в} + \kappa_{ж} + \kappa_{хл})\}$ . При расчетах  $\alpha_{в}$  взято из [2],  $\kappa_{ж}(\lambda_i) = \kappa_{ж}^0 \exp\{0,015(390 - \lambda_i)\}$ .

Согласно [3], представим  $\alpha_t$  и  $\beta_{\pi_t}$  в виде линейной комбинации моментов функции распределения частиц по размерам  $f_T(r)$

$$\beta_{\pi_t}(\lambda_i) = \pi \sum_{j=1}^J A_{ij} M_{j+1}, \quad \alpha_t(\lambda_i) = \pi \sum_{j=1}^J B_{ij} M_{j+1}, \quad (5)$$

где  $M_{j+1} = N_T \int_0^{R_m} f_T(r) r^{j+1} dr$  —  $j+1$ -й объемный момент  $f_T(r)$ ;  $N_T$  — концентрация терригенных частиц;  $R_m$  — их максимальный размер;  $A_{ij}$ ,  $B_{ij}$  — коэффициенты аппроксимации факторов обратного рассеяния  $K_\pi(r, \lambda_i)$  и ослабления  $K(r, \lambda_i)$  полиномами степени  $J-1$  на  $[0, R_m]$

$$K_\pi(r, \lambda_i) = \sum_{j=1}^J A_{ij} r^{j-1}, \quad K(r, \lambda_i) = \sum_{j=1}^J B_{ij} r^{j-1}. \quad (6)$$

Коэффициенты  $\beta_{\pi_p}$  и  $\alpha_p$  в (4) имеют вид

$$\beta_{\pi_p}(\lambda_i) = \frac{64\pi^5}{\lambda_i^4} N_p \bar{r}_p^6 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2, \quad \alpha_p(\lambda_i) = \frac{2}{3} \beta_{\pi_p}(\lambda_i), \quad (7)$$

где  $N_p$  — концентрация релеевских частиц,  $\bar{r}_p^6$  — среднее от шестой степени радиуса частиц. Подставляя (5), (7) в (4), получим систему  $I-1$  уравнений относительно  $J+1$  неизвестных моментов  $M_{j+1}$  и  $N_p \bar{r}_p^6$ . Система решалась численно путем минимизации относительной невязки между правой и левой частями (4) по всем длинам волн с ограничениями  $M_{j+1} > 0$ ,  $N_p \bar{r}_p^6 > 0$ ,  $\beta_{\pi_p} > 0$ ,  $\alpha_p > 0$  методом скользящего допуска [6].

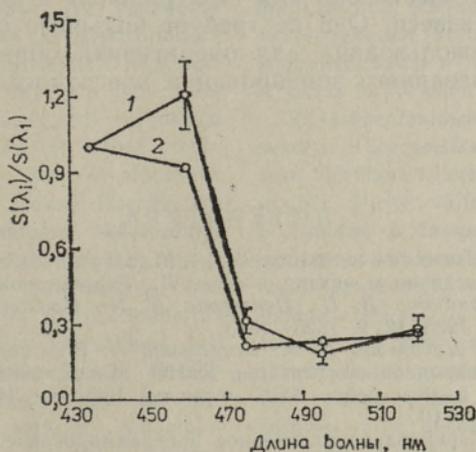


Рис. 1. Отношение лидарных сигналов  $S(\lambda_2)/S(\lambda_1)$ , измеренное в эксперименте (1) и вычисленное из решения прямой задачи с восстановленными параметрами гидрозоля (2) с учетом ослабления в морской воде.

При обработке результатов эксперимента по описанной методике ( $I=5$ ,  $J=3$ ) определены средние: сечение и объем терригенных частиц в единице объема воды  $M_2 = 0,263 \times 10^6$  мкм<sup>2</sup>/см<sup>3</sup>,  $M_3 = 7,32 \times 10^4$  мкм<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>, массовая концентрация  $C_T = 0,192$  мг/л (рис. 1). Спектральный ход зависимости коэффициентов обратного рассеяния терригенной взвеси и релеевских частиц и коэффициентов ослабления от длины волны зондирования (рис. 2) показывает, что основной вклад в обратное рассеяние вносят релеевские частицы, тогда как полный коэффициент ослабления излучения определяется терригенными частицами. На рис. 1 в качестве иллюстрации приведено отношение лидарных сигналов, вычисленное из решения прямой задачи с моментами, определенными выше. Наблюдается удовлетворительное согласие с экспериментом (величина невязки по всем длинам волн 0,235).

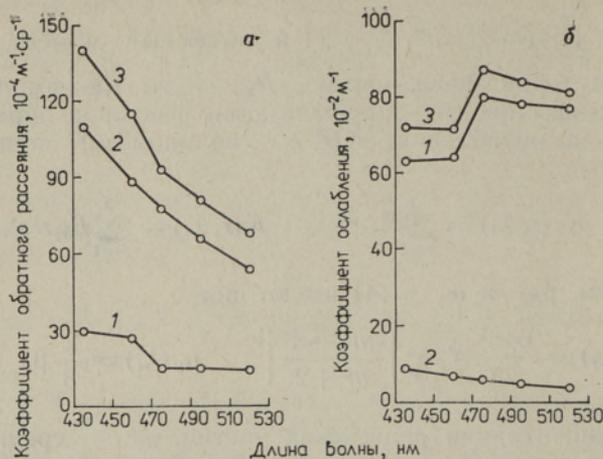


Рис. 2. Спектральный ход коэффициентов обратного рассеяния (а) и ослабления (б) для терригенной взвеси (1), релеевских частиц (2) и их суммы (3).

Таким образом, в работе на основе моментной модели гидрозоля развита методика восстановления интегральных и оптических параметров терригенной взвеси. Она не требует большого объема вычислений и может быть использована для оперативной обработки результатов многоволнового лазерного зондирования поверхностных вод.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Оптика океана. Физическая оптика океана. I. М., Наука, 1983.
2. Шифрин К. С. Введение в оптику океана. Л., Гидрометеиздат, 1983.
3. Егоров К. Д., Кандидов В. П., Пентегова Л. И., Прахов М. С. // Квантовая электроника, 1985, 12, 9, 1825—1833.
4. Бабиченко С. М., Дудельзак А. Э., Порывкина Л. В., Саар К. Ю. // Тез. докл. XIII Международной конференции КиНО. Минск, 1988, 213—214.
5. Отчет о работах в 18-м рейсе НИС «Арнольд Веймер», ИТЭФ АН ЭССР. Таллинн, 1987, 81—100.
6. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. М., Мир, 1975.

Специальное конструкторское бюро  
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию  
17/VI 1988

Московский государственный университет