

И.В. Алешин, С.А. Вицинский, А.Г. Журенков, И.Л. Ловчий, В.Ю. Матвеев, В.А. Яковлев

Модель оптической трассы многоспектрального зондирования морской среды

ГОИ им. С.И. Вавилова, г. Санкт-Петербург
НИИКИ ОЭП, г. Сосновъй Бор, Ленинградской обл.

Поступила в редакцию 15.03.2000 г.

Представлена модель трассы оптического зондирования морской среды на основе двухпоточного приближения теории переноса излучения и кусочно-линейной аппроксимации вертикального распределения примесей. Предложен метод решения обратной задачи оптического зондирования, позволяющий восстанавливать характеристики пространственного распределения концентраций примесей в приповерхностном слое моря.

Для полноценного и эффективного использования оптических методов при исследованиях морской среды необходимо создание адекватных реальности моделей трасс оптического зондирования. В данной статье рассматривается модель на основе двухпоточного приближения теории переноса излучения и кусочно-линейной аппроксимации вертикального распределения примесей. Предложен метод решения обратной задачи оптического зондирования, позволяющий восстанавливать характеристики пространственного распределения концентраций примесей в приповерхностном слое моря с разрешением, определяемым параметрами используемой измерительной аппаратуры [1–5].

Модель и метод базируются на том, что изменчивость оптических свойств морской среды обусловлена наличием в «чистой» морской воде конечного набора примесей в виде взвесей и растворенных веществ, и разработаны в рамках следующих предположений:

- при решении используется двухпоточное приближение теории переноса излучения (ТПИ) [6, 7];
- оптические характеристики морской воды (показатель рассеяния, коэффициент ослабления и т. д.) являются линейными функциями концентраций примесей [8];
- вертикальное распределение оптических свойств морской воды аппроксимируется кусочно-линейной функцией глубины (в частности, линейной или кусочно-постоянной) [2];
- факторы, искажающие результаты многоспектрального фотометрирования (состояние атмосферы, морской поверхности, аппаратные функции и т. п.), неизменны в процессе проведения измерений в исследуемом районе [2];
- ширины используемых оптических спектральных диапазонов достаточно малы ($\Delta\lambda/2 \sim 10$ нм);
- каждый из оптических параметров морской воды может быть представлен в следующем виде:

$$P_n(\lambda, z) = P_{n0}(\lambda) + \sum_{k=1}^K P_{nk}(\lambda) C_k(z), \quad (1)$$

где $P_n(\lambda, z)$ – n -й оптический параметр на длине волны λ и глубине z ; $P_{n0}(\lambda, z)$ – соответствующий параметр «чистой»

морской воды; $C_k(z)$ – концентрация k -й примеси на глубине z ; $P_{nk}(\lambda)$ – вклад k -й примеси в значение n -го параметра при ее единичной концентрации; K – общее число примесей, учитываемых в модели;

– вертикальные распределения концентраций оптически активных примесей аппроксимируются следующей моделью:

$$C_k(z) = T_{ki}(z - Z_{i-1}) + Y_{ki}, \quad z \in [Z_{i-1}, Z_i], \quad (2)$$

где $i = 1, M+1, Z_0 = 0, Z_{M+1} < \infty$; $M+1$ – число слоев в рассматриваемой модели; Z_i – глубина залегания нижней границы i -го слоя; Y_{ki} – концентрация k -й примеси на горизонте Z_{i-1} ; T_{ki} – градиент концентрации k -й примеси в i -м слое.

Модель вертикального распределения концентраций примесей (2) и модельная схема эксперимента по многоспектральному оптическому зондированию показаны на рис. 1.

В рамках данных предположений получено выражение для коэффициента диффузного отражения приповерхностного слоя моря (при $T_{ki} \equiv 0$):

$$R(\lambda) = E_{\uparrow}(\lambda)/E_{\downarrow}(\lambda) = \frac{1}{2} \left[\frac{B_1(\lambda)}{A_1(\lambda)} + \sum_{i=1}^M \left\{ \left(\frac{B_{i+1}(\lambda)}{A_{i+1}(\lambda)} - \frac{B_i(\lambda)}{A_i(\lambda)} \right) \exp \left(-2 \sum_{m=0}^{i-1} \{ A_{m+1}(\lambda)(Z_{m+1} - Z_m) \} \right) \right\} \right], \quad (3)$$

где

$$A_i(\lambda) = \mu^{-1} \left(a_w(\lambda) + \phi_w(\lambda) b_w(\lambda) + \sum_{k=1}^K \{ a_{0k}(\lambda) + \phi_{0k}(\lambda) b_{0k}(\lambda) \} Y_{ki} \right);$$

$$B_i(\lambda) = \mu^{-1} \left(\phi_w(\lambda) b_w(\lambda) + \sum_{k=1}^K \{ \phi_{0k}(\lambda) b_{0k}(\lambda) \} Y_{ki} \right); \quad (4)$$

$a_w(\lambda)$ – показатель поглощения света элементарным объемом «чистой» морской воды; $b_w(\lambda)$ – показатель рассеяния

света элементарным объемом «чистой» морской воды; $a_{0k}(\lambda)$ – удельный показатель поглощения света для k -й примеси; $b_{0k}(\lambda)$ – удельный показатель рассеяния света для k -й примеси; $\phi_w(\lambda)$, $\phi_{0k}(\lambda)$, μ – табулированные параметры, используемые в двухпоточковом приближении ТПИ [9].

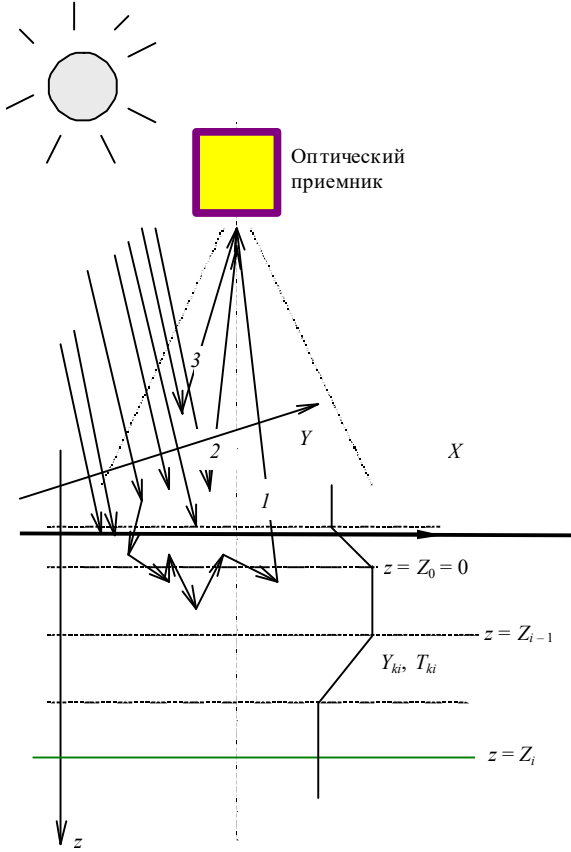


Рис. 1

Формула (3), с учетом соотношения $\Delta z_n = z_n - z_{n-1}$, аналогична формуле (2), полученной в [10]. Различие между ними состоит в том, что в (3) используются коэффициенты $A_i(\lambda)$, $B_i(\lambda)$, связанные соотношениями (4) с параметрами модели, тогда как в (2) присутствуют лишь характеристики $k_{di}(\lambda)$ и $b_{bi}(\lambda)$. Поэтому для согласования экспериментальных результатов с модельными расчетами параметры модели подбирались такими, что $A_i(\lambda) = k_{di}(\lambda)$ и $B_i(\lambda) = b_{bi}(\lambda)$.

Выражение (3) является базовым как для моделирования изменчивости коэффициента диффузного отражения $R(\lambda, \mathbf{r})$ при заданных возмущениях параметров T_{ki} , Y_{ki} , Z_i , так и для метода нахождения этих параметров во всех точках \mathbf{r} исследуемого района, для которых измерена восходящая облученность на уровне моря $E_{\uparrow}(\lambda, \mathbf{r})$.

Суть предлагаемых модели и метода можно проиллюстрировать следующим простым примером. В море находится одна примесь, которая распределена по глубине так, что имеются три слоя с различными, но неизменными (не зависят от горизонтальных координат и времени) концентрациями примеси. Единственный параметр, зависящий от координат и времени, – глубина границы раздела между первым (верхним) и вторым слоями Z_1 . Предполагается, что ее флуктуации связаны с наличием внутренних волн в морской толще. Используя выражение (3), легко расчи-

тать вид $R(\lambda, \mathbf{r})$ при отсутствии вкладов от рассеяния в атмосфере и отражения от морской поверхности. Двухмерная картина $R(\mathbf{r})$ при заданном λ приведена в работе [5]. В этой же работе предложено моделировать «реальную» картину регистрируемой приемником восходящей облученности $E_{\uparrow}(\lambda, \mathbf{r})$ с учетом вкладов:

- светового излучения, испытавшего многократное рассеяние в морской толще (1 на рис. 1);
- излучения, отраженного от границы раздела «море – атмосфера» (2 на рис. 1);
- излучения, рассеянного в атмосфере (3 на рис. 1).

Таким образом, $E_{\uparrow}(\lambda, \mathbf{r})$ в одном спектральном канале (с центральной длиной волны λ) моделировался как

$$E_{\uparrow}(\lambda, \mathbf{r}) = \xi(\lambda, \mathbf{r}) [R(\lambda, \mathbf{r}) + \zeta(\lambda, \mathbf{r})]; \quad (5)$$

$$\xi(\lambda, \mathbf{r}) = \xi(\lambda) + \delta\xi(\lambda, \mathbf{r}); \quad \zeta(\lambda, \mathbf{r}) = \zeta(\lambda) + \delta\zeta(\lambda, \mathbf{r}),$$

где $\delta\xi(\lambda, \mathbf{r})$, $\delta\zeta(\lambda, \mathbf{r})$ – малые по сравнению с $\xi(\lambda)$ и $\zeta(\lambda)$ величины.

Перейдем к рассмотрению некоторых аспектов и примеров решения обратных задач оптического зондирования. В общем случае решение обратной задачи оптического зондирования базируется на том, что функция $R(\lambda; x, y, z_0) = E_{\uparrow}(\lambda; x, y, z_0)/E_{\downarrow}(\lambda; x, y, z_0)$ – коэффициент диффузного отражения моря ($z_0 = 0$), может быть найдена по результатам дистанционных оптических измерений в N спектральных диапазонах. При $N \geq 2K(M+1) + M$ система уравнений, составленная из выражений (3), разрешается относительно не зависящих от λ параметров T_{ki} , Y_{ki} , и Z_i , характеризующих вертикальное распределение примесей, обычными методами решения систем уравнений.

Если принятая модель вертикального распределения примеси (в данном случае пигментов фитопланктона – хлорофилла) адекватна реальной ситуации, а изменчивость $R(\lambda = 443 \text{ нм})$ обусловлена только смещением верхней границы слоя z_1 , то определение изменчивости z_1 по результатам оптического зондирования (измерениям $R(\lambda)$) не составляет труда (кривая Z1a на рис. 2).

Однако при условии (5) попытка определить изменчивость z_1 только по результатам пассивного дистанционного оптического зондирования представляет собой типичный пример решения некорректной (некорректно поставленной) обратной задачи [8] (кривая Z1б на рис. 2).

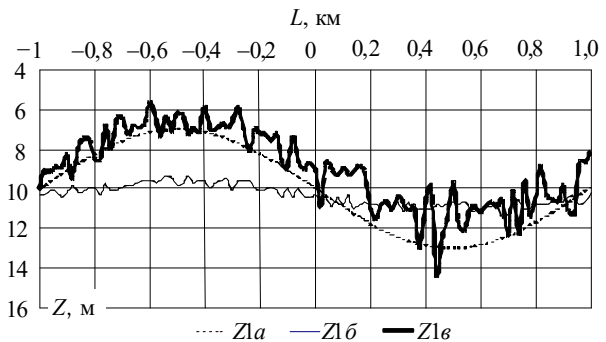


Рис. 2. Изменчивость $z_1(x) = Z_1$, восстановленная по значениям $R = R(\lambda = 443 \text{ нм})$. По горизонтальной оси – расстояние L в километрах, отсчитанное в направлении волнового вектора фоновой внутренней волны от условно выбранного начала координат. По вертикальной оси – глубина Z в метрах

Идея предлагаемой методики [1] восстановления характеристик пространственного распределения концентрации примесей, по данным многоспектрального оптического зондирования морской толщи, состоит в том, чтобы дополнить эти данные экспериментальными результатами измерений вертикального распределения оптических характеристик морской воды, полученными для нескольких реперных точек исследуемого района (акватории).

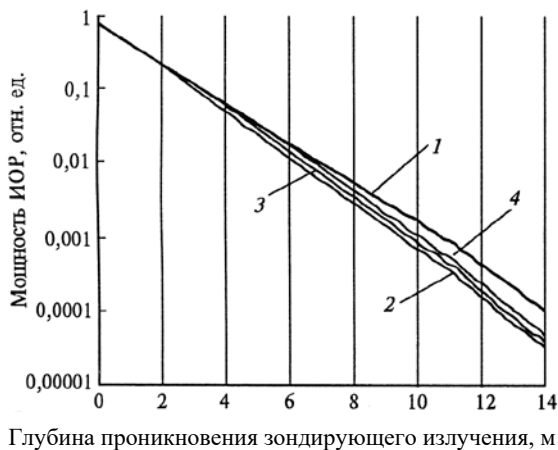


Рис. 3. Интенсивность обработки рассеяния при залегании слоя, обогащенного хлорофиллом, на глубинах 2, 4, 6 м относительно опорного сигнала

Такие данные могут быть получены путем контактного зондирования (с использованием погружаемых датчиков) или с помощью активного (лазерного) зондирования. В качестве примера на рис. 3 представлены расчетные зависимости интенсивности обратного рассеяния (ИОР) от глубины залегания приповерхностного слоя хлорофилла, моделирующие (с использованием метода Монте-Карло) результаты лазерного зондирования для стратификации, приведенной ранее на рис. 2 в [11], и следующих значений гидрооптических характеристик:

$$\lambda = 443 \text{ нм} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{— показатель общего рассеяния для обоих} \\ \text{слоев считается одинаковым, } c_1 = c_2 = 0,3 \text{ м} \\ \text{— показатели поглощения для верхнего слоя} \\ a_1 = 0,05 \text{ м}^{-1}, \text{ для нижнего слоя } a_2 = 0,1 \text{ м}^{-1}; \end{array} \right.$$

$$\lambda = 550 \text{ нм} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{— показатель общего рассеяния для обоих} \\ \text{слоев } c_1 = c_2 = 0,3 \text{ м}^{-1}; \\ \text{— показатели поглощения для обоих} \\ \text{слоев } a_1 = a_2 = 0,05 \text{ м}^{-1}. \end{array} \right.$$

Кривая 1 соответствует опорному каналу (т.е. длине волны зондирующего излучения 550 нм), где вклад поглощения хлорофилла пренебрежимо мал. Поэтому характер ее не меняется при погружении приповерхностного слоя хлорофилла. Кривые 2–4 соответствуют аналогичным

зависимостям для рабочего канала (с длиной волны 443 нм в полосе максимального поглощения хлорофилла) и различных глубин погружения верхней границы этого слоя – 2, 4 и 6 м. Каждая из этих кривых начинает отклоняться от «опорной» кривой 1 на глубинах, соответствующих положению этой границы. Полученная таким образом априорная (дополнительная) информация дает возможность значительно увеличить устойчивость и достоверность решения обратной задачи дистанционного оптического зондирования.

В частности, она может быть использована для создания методик коррекции результатов измерений, позволяющих значительно снизить влияние различных помех. Данные методики и алгоритмы обработки не рассматриваются в рамках настоящей статьи. Тем не менее, в качестве иллюстрации на рис. 2 приводится картина горизонтальной изменчивости $z_1 = Z1\epsilon$, полученная после применения методик и алгоритмов обработки. Разумеется, получить «идеальную» картину ($Z1a$) не удастся. Следует, однако, обратить внимание на то, что без коррекции можно получить внешне правдоподобные, но фактически недостоверные результаты (сопоставьте $Z1a$ с $Z1b$ и $Z1\epsilon$).

Рассмотренный подход используется и в рамках более сложных моделей пространственного распределения оптических параметров свойств морской воды. При этом в качестве механизма, вызывающего аномалии такого распределения могут, в частности, выступать также природные и антропогенные возмущения гидрофизических параметров морской среды.

Таким образом, изложенные результаты моделирования изменчивости оптических трасс зондирования позволяют расширить возможности многоспектральных оптических методов изучения морской среды.

1. Аleshin И.В., Цветков Е.А., Яковлев В.А. // Оптический журнал. 1997. Т. 64. № 3. С. 82–86.
2. Аleshin И.В., Журенков А.Г., Зурабян А.З., Яковлев В.А. // Оптический журнал. 1997. Т. 64. № 8. С. 82–86.
3. Аleshin И.В., Журенков А.Г., Зурабян А.З., Яковлев В.А. // Оптический журнал. 1998. Т. 65. № 5. С. 34–39.
4. Белоусов Ю.И., Борткевич А.В., Журенков А.Г., Зурабян А.З., Крюков С.Н., Хохлов В.Н., Яковлев В.А. // Оптический журнал. 1998. Т. 65. №12. С. 182–186.
5. Журенков А.Г. Теоретический анализ возможностей многоспектральных оптических методов исследования океана: Автореф. дис. СПб. Изд. СПбГЭТУ («ЛЭТИ»), 2000. 24 с.
6. Иванов А.П. Физические основы гидрооптики. Минск: Наука и техника, 1975. 503 с.
7. Долин Л.С., Левин И.М. Справочник по теории подводного видения. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 232 с.
8. Шифрин К.С. Введение в оптику океана. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 260 с.
9. Зеge Э.П., Иванов А.П., Кацев И.Л. Перенос изображения в рассеивающей среде. Минск: Наука и техника, 1985. 327 с.
10. Erdman J.C., Saint-Clair J.M. // SPIE. Ocean optics IX. 1988. V. 925. P. 37–41.
11. Аleshin И.В., Вицинский С.А., Журенков А.Г., Ловчий И.Л., Матвеев В.Ю., Яковлев В.А. Восстановление интегральных экологических характеристик морской среды из результатов ее многоспектрального оптического зондирования // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13. (В печати).

I.V. Aleshin, S.A. Vitsinsky, A.G. Zhurenkov, I.L. Lovchy, V.Yu. Matveev, V.A. Yakovlev. Model of optical path for multispectral sensing of marine medium.

A model of the route for optical sensing of marine environment based on the double-stream approximation of radiation transport theory and piecewise-linear approximation in vertical distribution of impurity is presented. The method is proposed for solving the inverse problem of optical sensing permitting the characteristics of spatial distribution of impurity concentrations in the subsurface sea layer to be restored.