

В.Н. Пелевин, В.В. Ростовцева

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСЕЙ В МОРСКОЙ ВОДЕ ПО СПЕКТРУ ВОСХОДЯЩЕГО СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Разработан метод оптимизации для решения обратной задачи оценки концентрации хлорофилла, мг/м^3 , растворенного органического «желтого» вещества и взвеси в единицах светопоглощения, м^{-1} , по спектру восходящего от поверхности воды излучения. Метод может быть использован как в открытом океане, так и для вод прибрежных зон, так как при его разработке не делалось никаких предположений о взаимной корреляции концентраций компонентов морской воды. Эффективность предложенного метода продемонстрирована при обработке экспериментальных данных по коэффициенту спектральной яркости моря, полученных с борта НИС в открытом море и в прибрежных акваториях.

В настоящее время для перспективных ИСЗ разработана многоканальная оптическая аппаратура, позволяющая оценивать спектр восходящего от системы «океан–атмосфера» излучения, например SeaWiFS (США) [1] и МОЗ-обзор (Германия, Россия). После атмосферной коррекции по этим данным восстанавливается спектр восходящего от морской поверхности излучения. В связи с этим решение обратной задачи определения экологического состояния морских акваторий по рассеянному приповерхностным слоем воды свету стало насущной задачей. Известные методики определения концентрации хлорофилла по цветовому индексу [2, 3] не обладают высокой точностью и, кроме того, используются только для открытого океана. В шельфовой зоне, где нарушается баланс между основными светорассеивающими и светопоглощающими компонентами морской воды, как правило, невозможно использовать методы оценки концентраций примесей, разработанные для открытого моря. В настоящее время таких методик для шельфа практически не существует.

Нами разработан и представлен метод определения концентраций светорассеивающих и светопоглощающих примесей в морской воде по спектру восходящего излучения, который может быть использован как в открытом океане, так и в шельфовой зоне. Для решения этой обратной задачи предложена последовательная оптимизация моделей рассеяния и поглощения света основными компонентами примесей. Оптимизация проводится таким образом, чтобы минимизировать отклонение расчетного спектра от полученных экспериментальных значений. В результате оптимизации получены оценки концентрации хлорофилла, показатели поглощения растворенного органического вещества и взвеси. Эффективность разработанного метода продемонстрирована при обработке данных дистанционного зондирования поверхности моря с борта НИС в открытом море и в прибрежных акваториях с различным составом морской воды.

Предложенный метод может быть эффективно использован для обработки информации с перспективных ИСЗ, а также при проведении подспутниковых измерений с борта судна или самолета.

1. Оптимизация моделей поглощения и рассеяния света морской водой для определения концентрации примесей по многоспектральным измерениям восходящего излучения

Пусть в результате дистанционного зондирования поверхности океана в видимом диапазоне спектра (400–600 нм) получен коэффициент спектральной яркости (КСЯ) поверхности в N спектральных поддиапазонах. Величина КСЯ определяется как показателем поглощения морской воды (κ), так и показателем рассеяния назад (β) [4]:

$$\rho_{\lambda} = k \beta_{\lambda} / (\kappa_{\lambda} + \beta_{\lambda}), \quad (1)$$

где k – эмпирически определенный неселективный по спектру коэффициент ($k \cong 0,11$).

Показатель поглощения света морской водой складывается из показателей поглощения чистой водой ($\kappa_{w\lambda}$), пигментами фитопланктона ($\kappa_{p\lambda}$), растворенным органическим веществом ($\kappa_{y\lambda}$) и взвесью (κ_{sm}):

$$\kappa_{\lambda} = \kappa_{w\lambda} + \kappa_{p\lambda} + \kappa_{y\lambda} + \kappa_{sm} . \quad (2)$$

Спектральные зависимости показателя поглощения каждого из указанных компонентов выбираем следующим образом. Примем значения $\kappa_{w\lambda}$, заданные в таблицах [4]. Показатель поглощения света взвешенными частицами без учета пигментов фитопланктона κ_{sm} считаем неселективным. Спектральные зависимости для других компонентов описываются следующими выражениями:

$$\kappa_{p\lambda} = C_p \kappa_{p\lambda}^* (C_p) , \quad (3)$$

где C_p – концентрация хлорофилла, мг/м³; $\kappa_{p\lambda}^*$ – удельное поглощение света пигментами фитопланктона, зависящее от самой концентрации хлорофилла [4];

$$\kappa_{y\lambda} = \kappa_y \exp[-g(\lambda - \lambda_0)] ; \quad (4)$$

κ_y – показатель поглощения света растворенным органическим («желтым») веществом на длине волны $\lambda_0 = 500$ нм; $g = 0,015$ нм⁻¹ [5].

Светорассеивающие свойства морской воды определяются молекулярным рассеянием и рассеянием взвесью. В качестве физической модели рассеяния света назад использовано выражение

$$\beta_{\lambda} = \beta_{w500} (500/\lambda)^{4,3} + \beta_z (590/\lambda)^q , \quad (5)$$

где $\beta_{w500} = 9,8 \cdot 10^{-4}$ м⁻¹ [4] – показатель рассеяния назад для чистой воды; β_z – показатель рассеяния назад гидрозолю при 590 нм. Величины β_z и q зависят от концентрации взвеси и распределения частиц по размерам ($q \rightarrow 4,3$ для очень мелких частиц взвеси, q принимает меньшие значения для крупной взвеси).

Подставляя (2)–(5) в (1), получаем физическую модель КСЯ, зависящую от пяти параметров: концентрации хлорофилла, показателей поглощения растворенного органического вещества и взвеси, показателя рассеяния на длине волны 590 нм и степени q . Их величины изменяются с изменением состава морской воды.

Для определения наиболее вероятных значений этих величин для акватории, где проведены измерения, решается задача минимизации суммы квадратов отклонений модельного спектра от измеренного.

Нужно отметить, что небольшие экспериментальные погрешности в измерениях КСЯ при минимизации по пяти параметрам могут привести к некоторому смещению оценок: чтобы избежать выхода на неглавный, локальный минимум, мы использовали существование корреляции между КСЯ при 590 нм, определяемым преимущественно показателем рассеяния взвеси (поглощение в этой области определяется в основном чистой водой), и поглощением взвеси κ_{sm} . Действительно, как было показано ранее [6], в довольно широких пределах величина КСЯ при 590 нм линейно зависит от концентрации взвеси (мг/м³). Естественно предположить, что и поглощение света взвесью пропорционально ее концентрации. С помощью обобщенных экспериментальных данных [7] мы получили выражение для зависимости среднего $\bar{\kappa}_{sm}$ от ρ_{590} :

$$\bar{\kappa}_{sm} = 9,5 \rho_{590} - 0,009 . \quad (6)$$

Будем считать, однако, что конкретный κ_{sm} и ρ_{590} не жестко связаны, а лишь коррелированы с дисперсией $(\bar{\kappa}_{sm}/3)^2$.

Теперь будем минимизировать целевую функцию вида

$$F = \sum_i (\rho_{\lambda i} (C_p, \kappa_y, \kappa_{sm}, \beta_z, q) - \rho_i)^2 \exp \left\{ \left[\frac{(\kappa_{sm} - \bar{\kappa}_{sm})}{(\bar{\kappa}_{sm}/3)} \right]^2 \right\}, \quad (7)$$

где $\rho_{\lambda i}(C_p, \kappa_y, \kappa_{sm}, \beta_z, q)$ – модельные значения КСЯ; ρ_i – данные измерений. Следует отметить, что зависимость (6) имеет физический смысл при $\rho_{590} > 0,001$, для обработки же наиболее прозрачных вод, где концентрация взвеси мала, никаких дополнительных условий на величину κ_{sm} не накладываем (второй множитель в (7) опускаем).

Минимизация (7) проводится в два этапа. Выбирая значения β_z и q из предварительно заданного поля возможных значений этих величин ($0 \leq \beta_z \leq 0,05$, $0 \leq q \leq 4,3$), определяем соответствующую такой модели рассеяния величину показателя поглощения для каждого измеренного значения КСЯ. На втором этапе для полученного спектра поглощения проводим поиск наиболее характерных значений показателей поглощения отдельных компонентов морской воды [8] в трехмерном пространстве параметров с координатами $x = C_p$, $y = \kappa_y$, $z = \kappa_{sm}$. Приравнявая производные по y и z нулю, получаем систему двух уравнений, линейных по y и z . При решении этой системы относительно y и z можно получить значения, которые при заданном x обеспечивают минимум целевой функции. После подстановки полученных выражений целевая функция преобразуется в функцию одной переменной x . Так как она не является квадратичной по x , то для поиска ее минимума используется метод «золотого сечения» [9]. Далее по найденному x рассчитываются значения y и z .

При работе методом «золотого сечения» требуется неоднократное вычисление функции $\kappa_{p\lambda}$, для чего необходимо знать зависимость удельного показателя поглощения света пигментами фитопланктона $\kappa_{p\lambda}^*$ от концентрации хлорофилла. В [10] в результате статистической обработки экспериментальных данных было подобрано выражение для зависимости удельного показателя поглощения света пигментами фитопланктона от цветового пигментного индекса $C_{In} = \kappa_{p443}^*/\kappa_{p661}^*$ и даны области наиболее вероятных значений C_{In} для широкого диапазона значений C_p . В разработанном алгоритме проведена сплайновая аппроксимация этой зависимости.

Полученные в результате проведенных вычислений значения неизвестных параметров ($q, \beta_z, C_p = x, \kappa_y = y, \kappa_{sm} = z$) подставляем в (7) для получения нулевого приближения минимального значения функции $F^{(0)}$. Далее выбираем новые значения β_z и q и повторяем всю процедуру до получения следующего значения $F^{(1)}$, фактически реализуя поиск минимума этой функции методом покоординатного спуска по двум переменным.

2. Результаты расчетов состава морской воды по коэффициенту спектральной яркости поверхности, измеренному в открытом океане и в прибрежной зоне

Сначала применим разработанный нами метод для оценки концентрации экологических компонентов морской воды вне шельфовой зоны. В [11] в результате обобщения многочисленных измерений были получены типовые зависимости КСЯ для вод различного типа. Для расчетов были выбраны воды, характеризующиеся индексами типа вод $1,5 \div 1,6$ (олиготрофные) и $2,0 \div 2,5$; $2,7 \div 3,7$ (мезотрофные воды). В качестве опорных значений при проведении оптимизации использовалось 21 значение КСЯ для каждой зависимости, выбранное в диапазоне 400–600 нм через 10 нм (на рис. 1 эти значения отмечены звездочками).

В результате работы программы, созданной по описанному выше методу определения состава морской воды, получены оптимальные модели спектров поглощения (кривые 1) и рассеяния назад морской воды (кривые 2) и соответствующие им модели КСЯ (кривые 3).

В таблице приведены полученные в результате оптимизации значения концентрации хлорофилла, показателей поглощения растворенного органического вещества (РОВ) и взвеси, показатели рассеяния на частицах взвеси на 590 нм и показатели степенной зависимости q . Видно, что в открытом океане при переходе от прозрачных вод к более мутным, а следовательно, и к более биопродуктивным водам значения этих параметров, определяемых концентрациями компонентов морской воды, возрастают в определенной пропорции: так, например, концентрация хлорофилла и поглощение «желтого вещества» возрастают в одинаковое число раз. Значение q меняется от 4,3 до 2,0, что говорит об увеличении вклада в рассеяние крупнодисперсной фракции, определяемой частицами органического происхождения.

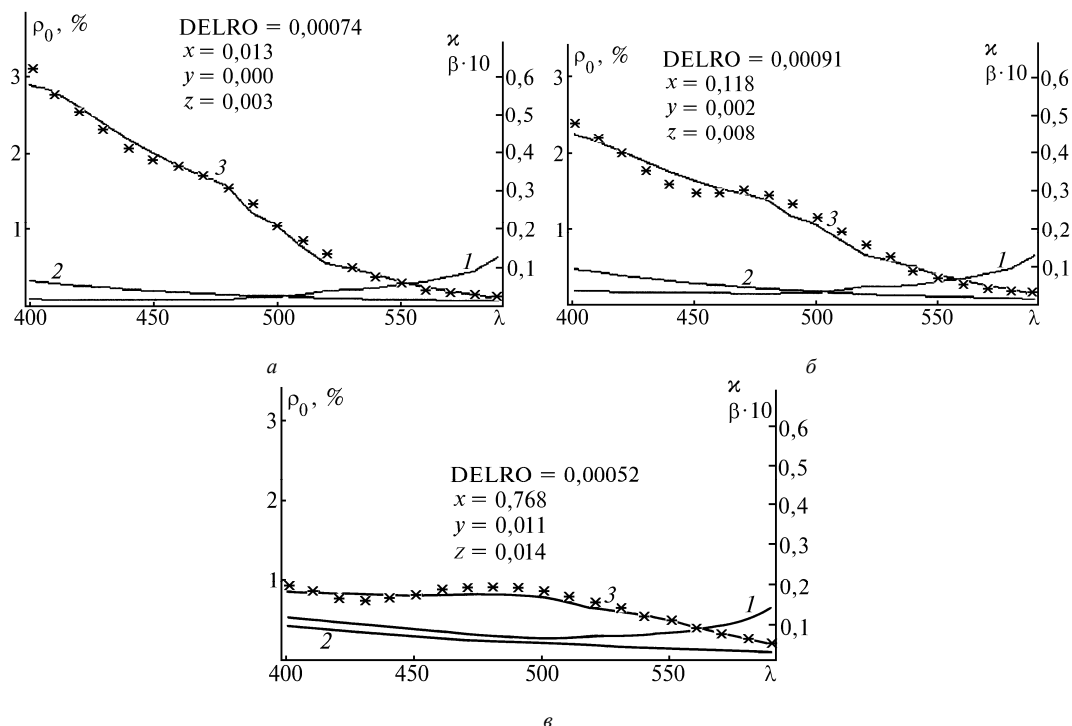


Рис. 1. Определение состава морской воды по значениям КСЯ, характерным для открытого моря: а – олиготрофные воды с индексом типа вод $m = 1,5 \div 1,6$; б – мезотрофные воды с $m = 2,0 \div 2,5$; в – мезотрофные воды с $m = 2,7 \div 3,7$ (точки – значения КСЯ, полученные усреднением экспериментальных данных); 1 – модельные кривые поглощения, 2 – модельные кривые рассеяния, 3 – модельная зависимость КСЯ, полученная в результате оптимизации

Концентрация хлорофилла C_p , показатели поглощения РОВ χ_y и взвеси χ_{st} , рассеяния гидрозоли при 590 нм β_z и степенной зависимости q , полученные в результате решения обратной задачи методом оптимизации, в сопоставлении с данными прямых измерений C_p

Тип вод	q	$\beta_z, \text{м}^{-1}$	$C_p, \text{мг/м}^3$	$\chi_y, \text{м}^{-1}$	$\chi_{st}, \text{м}^{-1}$	Прямые измерения $C_p, \text{мг/м}^3$
1,5÷1,6	4,3	$7,6 \cdot 10^{-4}$	0,013	$0,2 \cdot 10^{-3}$	$0,3 \cdot 10^{-2}$	$0,017 \pm 0,05$
2,0÷2,5	4,3	$1,3 \cdot 10^{-3}$	0,12	$0,2 \cdot 10^{-2}$	$0,8 \cdot 10^{-2}$	$0,21 \pm 0,10$
2,7÷3,7	2,0	$2,9 \cdot 10^{-3}$	0,75	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$0,43 \pm 0,27$
Ионическое море	4,3	$7,0 \cdot 10^{-4}$	0,01	$0,1 \cdot 10^{-2}$	$0,2 \cdot 10^{-2}$	< 0,02 0,04 (разные пробы)
Пр. Босфор	1,5	$1,5 \cdot 10^{-2}$	0,82	$7,8 \cdot 10^{-2}$	$5,4 \cdot 10^{-2}$	от 0,35 до 2,9 (разные пробы)

Предложенный метод был также использован для обработки дистанционных измерений КСЯ с борта НИС, выполненных как в открытом море, так и в шельфовой зоне. Измерения проводились специальным спектрофотометром конструкции В.А. Матюшенко [12].

На рис. 2 и 3 приведены результаты измерений и кривые, аппроксимирующие их в двух наиболее характерных акваториях – в Ионическом море, воды которого отличаются особой прозрачностью, и в Мраморном море, вблизи Стамбула. Видно, что в обоих случаях метод позволил получить хорошую аппроксимацию измеренных спектральных зависимостей ρ_λ .

Получившиеся при оптимизации значения концентрации хлорофилла в морской воде близки к измеренным непосредственно на пробах.

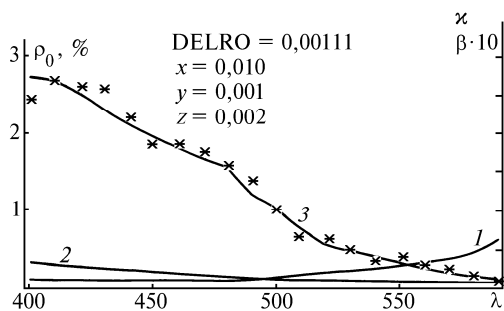


Рис. 2. Определение состава морской воды по дистанционным измерениям КСЯ с борта НИС в Ионическом море

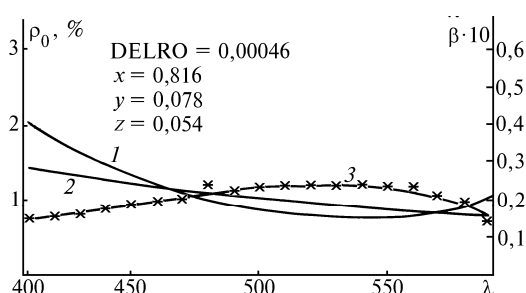


Рис. 3. Определение состава морской воды по измерениям КСЯ в Мраморном море, у входа в Босфор

Таким образом, разработанный нами метод обработки дистанционных измерений спектра восходящего от поверхности моря излучения позволяет оценивать состав морской воды. Метод может быть использован как в открытом океане, так и для вод прибрежных зон, так как при его разработке не делалось никаких предположений о взаимной корреляции концентраций компонентов морской воды.

1. Hooker B.B., Esaias W.E., Feldman G.S., Gregg W.W. and McLain C.R. An overview of SeaWiFS and ocean color // SeaWiFS technical report series. 1992. V. 1. P. 1–24.
2. Austin R.W. and Petzold T.J. The determination of diffuse attenuation coefficient of sea water using the Coastal Zone Color Scanner // Oceanography from space / J. Gower Ed. Plenum Press, New York. P. 239–256.
3. Gordon H.R., Clark D.K., et. al. Phytoplankton pigment concentrations in the Middle Atlantic Bight: comparison of ship determinations and CZCS estimates // Appl. Opt. 1983. V. 22. P. 20–36.
4. Оптика океана. Т. 1 / Под ред. А.С. Мониной. М.: Наука, 1983. 372 с.
5. Пелевина М.А. Методика и результаты измерений спектрального поглощения света растворенным органическим «желтым» веществом в водах Балтийского моря // Световые поля в океане. М.: ИОАН СССР, 1980. С. 92–97.
6. Пелевин В.Н. Оценка концентраций взвеси и хлорофилла в море по измеряемому с вертолета спектру выходящего излучения // Океанология. 1978. Т. 18. N 3. С. 428–434.
7. Пелевин В.Н. Оптические явления на поверхности океана / А.С. Монин, В.П. Красицкий. Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 375 с.
8. Пелевин В.Н., Ростовцева В.В. Оценка концентрации хлорофилла в морской воде по измерениям спектрального показателя вертикального ослабления света // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. N 12. С. 1778–1783.
9. Банди Б. Методы оптимизации. М.: Радио и связь, 1988. 128 с.
10. Wozniak B. and Ostrowska M. // Oceanologia (Pol.). 1990. N 29. P. 91–115.
11. Пелевин В.Н., Рутковская В.А. Об ослаблении потока солнечной энергии с глубиной в водах Индийского океана // Световые поля в океане. М.: ИОАН СССР, 1979. С. 73–85.
12. Матюшенко В.А., Пелевин В.Н., Ростовцева В.В. Измерение коэффициента яркости моря трехканальным спектрофотометром с борта НИС // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. N 5. С. 664–669.

Институт океанологии РАН,
Москва

Поступила в редакцию
15 июля 1996 г.

V.N. Pelevin, V.V. Rostovtseva. Determination of Sea-Water Admixtures Concentration by Upward Optical Radiation Spectrum.

The optimization method has been developed to solve the inverse problem of the estimation of chlorophyll concentration in $[mg/m^3]$, the dissolved organic matter, and suspended matter concentration in terms of light absorption $[m^{-1}]$ using upward see radiation spectrum. This method is valid both for the open sea and coastal zones since no conditions on the admixtures mutual correlation were implied during its development. The efficiency of the suggested method was demonstrated by processing of sea radiance experimental data obtained on board a research ship both in the open sea and coastal aquatoria.