

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ
И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.46

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

**Восстановление интегральных экологических характеристик
морской среды по результатам ее многоспектрального
оптического зондирования**

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

Поступила в редакцию 15.03.2000 г.

Рассмотрен ряд аспектов проблемы решения прямых и обратных задач оптического зондирования океана. Представлены результаты моделирования влияния вертикального распределения оптически активных примесей на изменчивость индекса цвета моря. Изложены практические процедуры оперативного восстановления экологических характеристик морской среды из результатов контактных измерений ее спектральной прозрачности.

В настоящее время дистанционные оптические методы исследований все шире используются для изучения природных и антропогенных процессов, протекающих в океане. В этой связи несомненный интерес представляют подходы к решению прямых и обратных задач многоспектрального оптического зондирования океана и границы раздела «океан – атмосфера». Ряд аспектов данной проблемы рассмотрен в настоящей статье.

**1. Влияние динамики вертикального
распределения оптически активных
примесей в морской среде
на изменчивость индекса цвета моря**

Известно, что максимальная достоверность результатов исследований достигается лишь при синхронном оптическом зондировании морской среды с различных пространственных уровней наблюдения с использованием не только дистанционной, но и контактной гидрооптической аппаратуры. Так, например, одно и то же изменение индекса цвета, зарегистрированное при дистанционном зондировании океана при помощи фотометра яркости с борта космической платформы, может быть обусловлено как соответствующим изменением общей (интегральной) концентрации пигментов фитопланктона во всем зондируемом приповерхностном слое моря, так и вертикальным перераспределением пигментов по глубине при сохранении неизменной их общей концентрации. Для того чтобы устранить подобную неоднозначность результатов зондирования, необходимы дополнительные синхронные исследования (например, использование лидарных систем самолетного базирования с возможностью стробирования импульсов обратного рассеяния или применение контактного оптического зондирования приповерхностного слоя с борта судовых носителей гидрооптической аппаратуры) [1, 2].

Обсудим более детально полученные с борта научно-исследовательского судна результаты комплексного эксперимента по синхронным дистанционному и контактному зондированию приповерхностного слоя воды у северных берегов Черного моря. Этот эксперимент был направлен на изучение влияния динамики вертикального распределения концентрации хлорофилла «А», регистрируемого погружаемым флуориметром, на изменчивость индекса цвета моря, контролируемого судовым фотометром яркости моря. Напомним, что индекс цвета моря I_{12} есть

$$I_{12} = B_1/B_2, \quad (1)$$

где B_1 и B_2 – яркости восходящего потока естественного света от небосвода и Солнца, диффузно отраженного толщиной моря на длинах волн $\lambda_1 = 443$ и $\lambda_2 = 550$ нм.

На рис. 1 воспроизведены характерные вертикальные профили температуры и интенсивности флуоресценции хлорофилла «А» в приповерхностном слое моря до и после природного гидродинамического возмущения (предположительно, обрушения внутренних волн). Как следует из этого рисунка, такое возмущение привело к «поджатию» приповерхностного слоя хлорофилла, причем верхняя граница его опустилась, а нижняя (в районе сезонного слоя скачка гидрофизических характеристик) поднялась по сравнению с их фоновым положением. Поскольку видимость белого диска (z_6) в данной акватории не превышала 8–10 м, а глубина расположения сезонного слоя скачка гидрофизических характеристик достигала 25 м, то основной вклад в наблюдаемое изменение индекса цвета в данном случае, очевидно, вносило смещение именно верхней границы слоя хлорофилла «А» (находившейся первоначально на глубине примерно 1–1,5 м). Заглубление этой границы в данном случае может быть связано не только с эффективным уменьшением концентрации хлорофилла вблизи поверхности моря, но и с частичной деструкцией этого пигмента при гидродинамическом воздействии.

Рассмотрим на данном конкретном примере методику решения прямой задачи оптического зондирования для реальных значений гидрооптических характеристик морской среды. Используем стандартный набор усредненных значений гидрооптических характеристик для поверхностных вод прибрежных районов северной части Черного моря на длине волны 443 нм (в полосе поглощения хлорофилла) [3]:

- вероятность выживания фотона – $\Lambda(443) = b/c = 0,86$;
- показатель ослабления света – $c(443) = a + b = 0,42 \text{ м}^{-1}$;
- показатель рассеяния света – $b(443) = 0,36 \text{ м}^{-1}$;
- показатель поглощения света – $a(443) = 0,06 \text{ м}^{-1}$;
- глубина проникновения света – $z_{0,95} = 17 \text{ м}$.

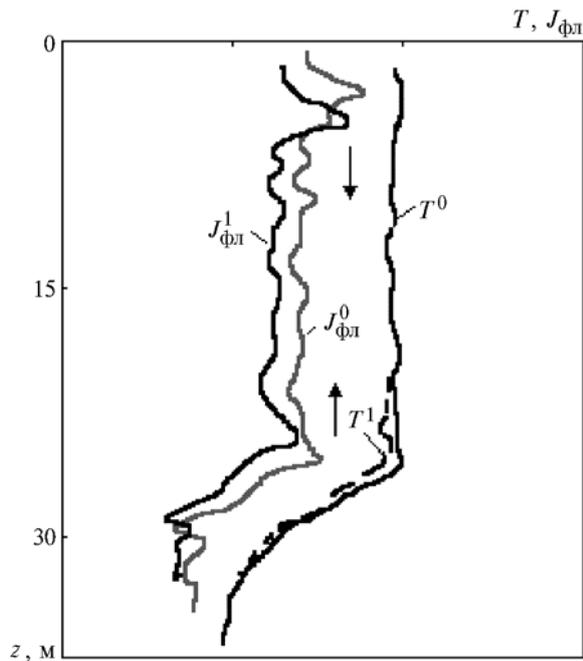


Рис. 1. Изменчивость вертикального распределения гидрофизических характеристик: $J_{\text{фл}}$ и T – вертикальные профили интенсивности флуоресценции хлорофилла «А» и температуры до ($J_{\text{фл}}^0, T^0$) и после ($J_{\text{фл}}^1, T^1$) природного гидродинамического возмущения; z – глубина

Учитывая сделанные выше замечания, выберем двухслойную модель стратификации гидрооптических характеристик (рис. 2), используя при этом измеренные в эксперименте значения показателей вертикального ослабления подводной облученности k_d и обратного рассеяния b_b для каждого из слоев. Будем считать, что индекс цвета моря $I_{443/550}$ может быть представлен в виде

$$I_{443/550} \sim R(443)/R(550), \quad (2)$$

где – $R(443)$ и $R(550)$ – коэффициенты диффузного отражения толщи моря соответственно на длинах волн 443 и 550 нм.

Поскольку длине волны 550 нм соответствует минимум поглощения света хлорофиллом (поэтому этот спектральный канал и выбран опорным), то практически вся изменчивость индекса цвета ($I_{443/550}$), обусловленная динамикой вертикального распределения этого пигмента, будет определяться соответствующей изменчивостью коэффициента диффузного отражения $R(443)$ моря в полосе поглощения хлорофилла 443 нм (рабочий спектральный канал).

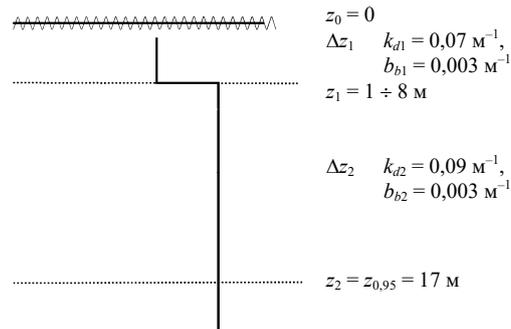


Рис. 2. Двухслойная модель стратификации гидрооптических характеристик: Δz_1 – толщина приповерхностного слоя, бедного хлорофиллом; Δz_2 – толщина приповерхностного слоя максимального содержания хлорофилла; k_{d1} и k_{d2} – показатели вертикального ослабления подводной облученности соответственно для 1-го и 2-го слоев; b_b – показатель обратного рассеяния толщи морской среды (определяющийся содержанием в ней минеральной взвеси), примерно одинаковый для обоих слоев; слой скачка находится на глубине 23–27 м

В соответствии с [4] для многослойной модели океана коэффициент диффузного отражения $R(\lambda)$ N слоев морской воды, отличающихся гидрооптическими характеристиками, может быть представлен в виде

$$R(\lambda) = \sum_{n=1}^N R_n(\lambda) \prod_{i=1}^n T_i^2(\lambda), \quad (3)$$

где λ – длина волны света; $R_n(\lambda)$ – отражение n -го слоя:

$$R_n(\lambda) = \frac{b_b(\lambda)}{2k_{dn}(\lambda)} \{1 - \exp[-2k_{dn}(\lambda) \Delta z_n]\};$$

T_i – пропускание i -го слоя, $T_i(\lambda) = \exp[-k_{di}(\lambda) \Delta z_i]$; $b_b(\lambda)$ – показатель обратного рассеяния света водной средой; $k_{dn}(\lambda)$ – показатель вертикального ослабления света n -м слоем водной среды; Δz_n – толщина n -го слоя водной среды (в пределах которого k_{dn} и b_b считаются постоянными); n и i – номера слоев водной среды.

Рассчитаем относительную изменчивость $\Delta R(443)/R(443)$ в зависимости от глубины погружения верхней границы приповерхностного слоя хлорофилла для практического случая, представленного на рис. 2. Пренебрежем для простоты вкладом рассеяния хлорофилла (т.е. будем считать, что обратное рассеяние в приповерхностном слое создается минеральной взвесью, равномерно распределенной вплоть до слоя скачка $b_b = b_{b1} \approx b_{b2}$). Тогда формула (3) примет следующий вид:

$$R(443) = \frac{b_b}{2k_{d1}} [1 - \exp(-2k_{d1} \Delta z_1)] + \frac{b_b}{2k_{d2}} [1 - \exp(-2k_{d2} \Delta z_2)] \exp(-2k_{d1} \Delta z_1). \quad (4)$$

В качестве примера рассчитаем изменение коэффициента диффузного отражения моря $R(443)$ в полосе поглощения хлорофилла 443 нм при смещении верхней границы приповерхностного слоя хлорофилла от границы раздела «море – атмосфера» до глубины 8 м. Если верхняя граница этого слоя z_1 совпадает с границей раздела «море – атмо-

сфера» (т.е. $z_1 = 0$), то из формулы (4) следует, что $R(443) \approx 0,015$. Расчетная зависимость $\Delta R(z_1)/R_1$ (где R_1 – коэффициент диффузного отражения, когда верхняя граница приповерхностного слоя хлорофилла находится на глубине 1 м) приведена в табл. 1.

Таблица 1

Относительная изменчивость коэффициента диффузного отражения $R(443)$ для двухслойной модели при погружении верхней границы z_1 слоя максимального содержания хлорофилла «А» в глубь морской среды

$z_1, \text{ м}$	1	2	3	4	5	6	7	8
$R \cdot 10^2$	1,71	1,72	1,74	1,78	1,81	1,84	1,86	1,88
$\Delta R/R_1, \%$	0	0,6	1,8	4,1	5,9	7,6	8,7	9,9

Из табл. 1 видно, что при смещении верхней границы приповерхностного слоя хлорофилла на 1 м индекс цвета морской поверхности меняется на 1–2%, что может быть зарегистрировано экспериментально.

Далее обратимся к практической процедуре оперативного восстановления экологических характеристик морской среды из результатов контактных измерений ее спектральной прозрачности *in situ*.

2. Оперативная оценка экологических характеристик морской среды из результатов контактного многоспектрального зондирования

Напомним, что ослабление мощности параллельного монохроматического пучка света в природной водной среде за счет его поглощения и рассеяния чистой водой и оптически-активными примесями (ОАП) описывается законом Бугера [5, 6]:

$$P(\lambda) = P_0(\lambda) \exp[-c(\lambda)L], \quad c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda), \quad (5)$$

где λ – длина волны зондирующего света; $c(\lambda)$, $a(\lambda)$ и $b(\lambda)$ – показатели ослабления, поглощения и рассеяния света; $P_0(\lambda)$ и $P(\lambda)$ – мощности светового потока на входе светового пучка в слой водной среды толщиной L и на выходе из нее.

Связь показателей поглощения $a(\lambda)$ и рассеяния $b(\lambda)$ с объемными концентрациями C соответствующих ОАП в первом (линейном) приближении [1, 4] дается соотношениями:

$$a(\lambda) = a_0(\lambda)C; \quad (6)$$

$$b(\lambda) = b_0(\lambda)C, \quad (7)$$

где $a_0(\lambda)$ и $b_0(\lambda)$ – удельные показатели поглощения и рассеяния ОАП.

Ослабление света природной водной средой (со «стандартным» набором ОАП природного происхождения) может быть представлено в виде [1, 4]:

$$c(\lambda) = a_w(\lambda) + b_w(\lambda) + a_{ph}(\lambda) + b_{ph}(\lambda) + a_y(\lambda) + a_s(\lambda) + b_s(\lambda) \approx c_w(\lambda) + a_{ph}(\lambda) + a_y(\lambda) + b_s(\lambda) \quad (8)$$

или

$$c(\lambda) - c_w(\lambda) \approx a_{oph}(\lambda)C_{chl} + a_{oy}(\lambda)C_y + b_{os}(\lambda)C_s, \quad (9)$$

где $c_w(\lambda)$ – ослабление света чистой водой (табулированная величина) за счет поглощения $a_w(\lambda)$ и рассеяния $b_w(\lambda)$ молекулами воды; $a_{ph}(\lambda)$, $a_y(\lambda)$, $a_s(\lambda)$ – показатели поглощения пигментами фитопланктона, желтым веществом и частицами взвеси (величиной $a_s(\lambda)$ обычно пренебрегают); $b_s(\lambda)$, $b_{ph}(\lambda)$ – показатели общего рассеяния частицами морской взвеси и фитопланктона (величиной $b_{ph}(\lambda)$ также обычно пренебрегают); $a_{oph}(\lambda)$, $a_{oy}(\lambda)$ – удельные показатели поглощения пигментами фитопланктона и желтым веществом; $b_{os}(\lambda)$ – удельный показатель рассеяния света частицами морской взвеси; C_{chl} , C_y и C_s – объемные концентрации хлорофилла «А», желтого вещества и взвеси.

Пусть в общем случае природная водная среда, содержащая n видов ОАП, зондируется в p специальным образом подобранных спектральных каналах, соответствующих спектральным особенностям этих ОАП. Тогда на глубине z суммарный показатель ослабления света можно представить в виде [1]:

$$c(\lambda_j, z) - c_w(\lambda_j) = \sum_{i=1}^n \alpha_{oi}(\lambda_j) C_i(z), \quad (10)$$

где $j = 1, 2, \dots, p$. Здесь λ_j – длина волны зондирующего света, соответствующая j -у спектральному каналу; $\alpha_{oi}(\lambda_j)$ – обобщенный показатель удельного поглощения или рассеяния i -й ОАП (известная величина); $C_i(z)$ – концентрация i -й ОАП на глубине z .

Таблица 2

Экспериментально измеренные при контактном фотометрировании значения спектральных показателей ослабления света и восстановленные из них экологические характеристики водной среды

Экспериментально измеренные спектральные показатели ослабления света морской водой				Восстановленные гидрооптические и экологические характеристики морской воды			
$c(360), \text{ м}^{-1}$	$c(443), \text{ м}^{-1}$	$c(550), \text{ м}^{-1}$	$c(650), \text{ м}^{-1}$	$a_y(360), \text{ м}^{-1}$	$b_s(650), \text{ м}^{-1}$	$C_y, \text{ мг/л}$	$C_s, \text{ мг/л}$
9,4	5,5	2,8	2,4	5,4	2,1	23,8	4,2
8,8	4,9	2,4	2,1	5,5	1,8	24,2	3,6
7,6	4,1	1,8	1,7	5,2	1,4	22,9	2,8

В качестве примера обратимся к эксперименту по изучению пространственного распределения спектральной прозрачности вод Невской Губы Финского залива Балтийского моря с целью оперативной оценки их экологического состояния в местах интенсивного антропогенного воздействия [3]. В ходе этого эксперимента с борта быстроходного катера

проводились измерения прозрачности одновременно в четырех спектральных каналах видимого и УФ-диапазонов спектра, выбранных в соответствии со спектральными особенностями наиболее распространенных природных ОАП (желтого вещества, пигментов фитопланктона, взвешенных частиц). Измеренные значения спектральных показателей ослабления

света для одного из контролируемых районов приведены в табл. 2. Рабочие спектральные диапазоны (360, 443, 550, 650 нм) выбраны в местах спектральных особенностей указанных выше ОАП. Учитывая спектральные особенности выбранных ОАП и чистой воды, систему уравнений (10) можно упростить:

$$\begin{aligned} c(360) - c_w(360) &\approx a_y(360) + b_s(360); \\ c(443) &\approx a_{ph}(443) + a_y(443) + b_s(443); \\ c(550) &\approx a_y(550) + b_s(550); \\ c(650) - c_w(650) &\approx b_s(443). \end{aligned} \quad (11)$$

В (11) предполагается, что:

– в УФ-диапазоне спектра ослабление света определяется поглощением желтого вещества, а также рассеянием на взвеси;

– в сине-фиолетовом диапазоне спектра ослабление света определяется поглощением чистой воды, желтого вещества, пигментов фитопланктона и рассеянием на взвеси;

– в зеленом диапазоне спектра ослабление света определяется поглощением желтого вещества и рассеянием на взвеси;

– в красном диапазоне спектра ослабление света определяется в основном рассеянием на взвеси;

– в синем и зеленом диапазонах спектра ослаблением света чистой водой можно пренебречь.

Для оперативных оценок такие довольно грубые предположения вполне оправданы [3].

Воспользуемся проверенными для вод Балтийского моря соотношениями [3, 6, 7]:

$$b_s(\lambda) \sim 1/\lambda; \quad (12)$$

$$a_y(\lambda) = a_y(360) \exp[-0,017(\lambda - 360)] \quad (13)$$

в диапазоне длин волн 360–490 нм;

$$a_y(\lambda) = 0,154 a_y(360) \exp[-0,011(\lambda - 500)] \quad (14)$$

в диапазоне длин волн 500–680 нм.

Тогда из (11) и (12) нетрудно определить $b_s(650)$, $b_s(360)$ и $a_y(360)$. Далее, используя значения $a_y(360)$, $b_s(650)$, из (12, 13) можно оценить $a_y(443)$, $b_s(443)$ и $a_{ph}(443)$. Затем таким же образом используя $a_y(360)$, $b_s(650)$, из (12, 14) можно определить $a_y(550)$, $b_s(550)$ и т.д. В табл. 2 приведены восстановленные таким образом значения показателей поглощения желтого вещества (на длине волны 360 нм) и рассеяния на взвеси (на длине волны 650 нм). Воспользовавшись известными из литературы соответствующими значениями удельных показателей поглощения желтого вещества и удельных показателей рассеяния на взвеси для внутренних вод и морских вод прибрежных районов [6], можно восстановить и концентрации этих ОАП (приведены в табл. 2).

К сожалению, восстановить подобным же образом показатели поглощения фитопланктона и оценить его содержание в морской воде по результатам контактного измерения прозрачности *in situ* не представляется возможным. Дело в

том, что для изучавшихся районов Финского залива характерны очень высокие значения концентраций пигментов фитопланктона (12–30 мг/м³ и более) [8], что обуславливает сильную зависимость удельного показателя поглощения $a_{oph}(\lambda)$ от содержания в морской воде этих пигментов и приводит к тому, что формула (6) перестает быть справедливой. Для решения поставленной задачи в этом случае целесообразно использовать контактные исследования флуоресценции хлорофилла «А», содержащегося в морской воде [7].

Анализ приведенных в табл. 2 восстановленных из гидрооптического эксперимента гидрооптических и экологических характеристик морской среды показывает, что наблюдаемая довольно значительная изменчивость значений экспериментально измеренных показателей ослабления света морской водой обусловлена, в основном, пространственно-временной изменчивостью содержания в ней взвешенных частиц. Показатель поглощения и концентрация желтого вещества меняются значительно меньше. Относительно высокие значения показателей поглощения желтого вещества и показателей рассеяния на взвеси и их концентраций свидетельствуют о высоком уровне антропогенной нагрузки на воды контролируемого района Финского залива. Погрешность восстановления экологических характеристик природных вод из результатов их гидрооптических исследований не превышает 20–30%, что вполне приемлемо для оперативного экологического контроля. Арбитражные оценки этих характеристик должны производиться аналитическими методами на специально подготовленных пробах морской воды [7, 8].

Заключение

Таким образом, используя упрощенные алгоритмы восстановления экологических характеристик морской среды из результатов ее многоспектрального оптического зондирования, удастся обеспечивать оперативную оценку экологического состояния контролируемой акватории, что особенно важно при проведении экологического контроля в местах интенсивных техногенных воздействий (в том числе в местах затопления в море химических и радиоактивных отходов, подводной добычи полезных ископаемых, интенсивного судоходства и т.д.).

1. Аleshin И.В., Цветков Е.А., Яковлев В.А. // Оптический журнал. 1997. Т. 64. № 3. С. 82–86.
2. Аleshin И.В., Вицинский С.А., Журенков А.Г., Ловчий И.Л., Матвеев В.Ю., Яковлев В.А. // Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 11. С. 71–77.
3. Аleshin И.В., Андреев Г.Д., Марков Е.Е., Рябова В.Н. // Материалы конгресса «Экология России». М.: Универсум, 1993. С. 10.
4. Erdman J.C., Saint-Clair J.M. // SPIE. Ocean optics IX. 1988. V. 925. P. 37–41.
5. Аleshin И.В. Экологический мониторинг Мирового океана: Учебное пособие для студентов вузов. СПб.: изд-во ГМТУ, 1997. 85 с.
6. Кондратьев К.Я., Поздняков Д.В. Качество природных вод и определяющие его компоненты. Л.: Наука, 1984. 54 с.
7. Копелевич О.В., Левин И.М. // Оптический журнал. 1997. Т. 64. № 3. С. 71–81.
8. Аleshin И.В. Экология моря: Учебное пособие для студентов вузов. СПб.: изд-во ГМТУ, 1995. 105 с.

I.V. Aleshin, S.A. Vitsinsky, A.G. Zhurenkov, I.L. Lovchy, V.Yu. Matveev, V.A. Yakovlev. Reconstruction of integral ecological characteristics of marine medium from the results of multispectral optical sensing.

A number of aspects regarding the problem of solving the direct and indirect tasks of optical ocean sensing is examined. The simulation results on variability in the colour index of sea influenced by vertical distribution of optically active impurities are presented. Practical procedures for an operative restoration of marine environment ecological characteristics from the results of contact measuring of spectral transmittance are described.