

УДК 551.465

## Метод получения спектров поглощения морской воды по данным пассивного дистанционного зондирования с борта судна с использованием свойств чистой воды

В.В. Ростовцева\*

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН  
117997, г. Москва, Нахимовский пр., 36*

Поступила в редакцию 30.07.2015 г.

Предложен оригинальный метод калибровки спектров коэффициента яркости водной поверхности, измеренных с борта движущегося судна с помощью трехканального оптического спектрофотометра. В методе использованы особенности поглощения света чистой водой. В результате его применения по спектрам коэффициента яркости могут быть восстановлены спектры поглощения морской воды. Представлены результаты обработки измерений в прибрежной акватории российского побережья Черного моря в районе влияния стока рек. Показана эффективность калибровки измеренных спектров, полученных в условиях переменной облачности и ветра. По полученным спектрам поглощения оценены концентрации основных примесей в морской воде исследуемой акватории и проведено сравнение этих оценок с результатами прямого анализа взятых проб воды. Показано, что предложенный метод оценки состава морской воды, включающий в себя дистанционные измерения коэффициента яркости моря с борта судна, калибровку этих спектров с получением спектров поглощения света морской водой и определение по ним концентрации основных примесей, может применяться при исследовании зон шельфа и внутренних морей, так как он не использует предположения о наличии какой-либо корреляции между концентрациями фитопланктона, растворенной органики («желтого вещества») и взвеси.

*Ключевые слова:* спектры коэффициента яркости моря, поглощение и рассеяние света морской водой, приустьевая акватория Черного моря, концентрации основных природных примесей – фитопланктона, растворенной органики («желтого вещества») и взвеси; spectra of the seawater surface radiance coefficient, sea water absorption and scattering, river mouth aquatorium of the Black Sea, main sea water admixture concentrations – phytoplankton pigments, dissolved organic matter (“yellow substance”), and suspended matter.

### Введение

Одними из наиболее эффективных методов оценки состава морской воды являются методы, связанные с измерением ее оптических свойств. К настоящему времени накоплен богатый материал для установления связи между оптическими свойствами вод и концентрациями, а также составом основных естественных примесей. Основу массива накопленных данных по поглощению, рассеянию света и флуоресценции составляют результаты многолетних исследований морских вод с различными по составу примесями с помощью погружаемых и проточных прозрачномеров, спектрофотометров, измерителей флуоресценции, диска Секки, а также лидаров [1–8].

При использовании пассивных методов зондирования регистрируются потоки солнечного света, рассеянного водной толщей. Величина их в основном зависит только от поглощения и рассеяния света морской водой, так как доля флуоресцентного

отклика воды, возбужденного солнечным излучением, пренебрежимо мала. Связь светопоглощения и светорассеяния воды с концентрацией примесей при этом наиболее тесная, и ее можно считать практически однозначной. Одной из наиболее информативных оптических характеристик морской воды, определяемых пассивными методами, является коэффициент спектральной яркости (КСЯ) морской воды. Поток идущего из морской толщи излучения несет информацию обо всех оптически активных компонентах морской воды, каждый из которых определенным образом влияет на форму указанного спектра [9–13].

Измерение спектра КСЯ с борта судна, однако, затруднено, так как необходимо выделять сигнал, идущий из толщи воды, на фоне отраженного поверхностью солнечного света. Для исключения отраженного сигнала был разработан подповерхностный спектрофотометр, измеряющий подповерхностную облученность и восходящее из толщи воды излучение, но для своей работы он требует погружения прибора на станциях или устройства буксировки [14, 15].

\* Вера Владимировна Ростовцева (vera@ocean.ru).

Для решения задачи дистанционного измерения КСЯ были предложены трехканальные радиометры, измеряющие яркость нисходящего и восходящего потоков света и яркость участка неба, дающего наибольший вклад в отраженный от поверхности воды сигнал, получены и обработаны спектры КСЯ с борта НИС [16–20]. Однако оказалось, что получаемые спектры сильно зависят от условий проведения измерений, что, вероятно, и препятствует широкому использованию данного метода. Предложенный нами метод калибровки снимает жесткие требования к метеорологическим условиям, при которых можно получать удовлетворительные результаты. Метод основан на учете поглощения и рассеяния света чистой морской водой, которая практически не содержит примесей ни в виде суспензии или взвеси, ни в растворенном виде.

Особую ценность дистанционный метод оценки КСЯ приобретает в том случае, когда необходимо разработать или уточнить региональный алгоритм дешифрирования спутниковой информации, относящейся к конкретному морскому водоему и определенному сезону [см., например, 21–23]. При этом помимо минимально необходимых данных судовых измерений (прямыми, контактными методами) требуется измерить характеристики восходящего потока излучения, который уже вошел в атмосферу, но еще не подвергся ее влиянию. Только в этом случае появляется возможность максимально корректно учесть влияние атмосферы. Кроме того, для сбора количества информации, достаточного для разработки регионального алгоритма дешифрирования в прибрежных акваториях и внутренних морях (водах типа 2 [1, 2]), учитывая большую пространственную и временную изменчивость их характеристик, необходимо использовать оперативные методы зондирования, позволяющие производить измерения на ходу судна с высокой частотой замеров. Высокое разрешение имеет особое значение при мониторинге прибрежных акваторий в районах влияния материкового стока.

В настоящей статье описан метод измерения КСЯ с борта движущегося судна с помощью трехканального оптического спектрофотометра. Предложен и апробирован новый метод калибровки, позволяющий использовать спектры, полученные при воздействии облачности и ветра при измерениях. По этим спектрам восстанавливаются спектральные показатели поглощения воды и оцениваются концентрации основных примесей в морской воде в районе исследования.

### Спектры коэффициента спектральной яркости, определяемые при дистанционном зондировании морской поверхности с борта судна

Коэффициент спектральной яркости определяется как отношение яркости излучения, выходящего из водной толщи, к яркости горизонтальной иде-

ально рассеивающей поверхности, характеризующей облученность водной поверхности Солнцем:

$$\rho(\lambda) = \frac{B_{up}}{B_{down}}. \quad (1)$$

Выражая величину излучения, восходящего от тонкого водного слоя, через показатели рассеяния назад и поглощения света в этом слое и интегрируя по всей водной толще (при этом показатели берутся средними по просвечиваемому Солнцем слою), можно получить выражение для КСЯ, связанное с оптическими характеристиками вод [3, 4]:

$$\rho(\lambda) = \frac{k_0 b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)}, \quad (2)$$

где  $b_b(\lambda)$  – показатель обратного рассеяния водной толщи;  $a(\lambda)$  – показатель поглощения воды;  $k_0$  – некоторый постоянный коэффициент, определяемый пропусканием света через поверхность раздела водной и воздушной сред.

Для определения КСЯ с борта судна в каждой точке измерялись три величины. Во-первых, яркость восходящего от моря излучения, включающая в себя яркость рассеянного водной толщей излучения, и яркость света, отраженного морской поверхностью. Во-вторых, яркость участка неба, дающего наибольший вклад в отраженное излучение. В-третьих, яркость белого диффузного горизонтально расположенного отражателя, характеризующая облученность морской поверхности. Оценка КСЯ моря производилась по формуле

$$R(\lambda) = \frac{B_{sea} - rB_{sky}}{B_{ws}}, \quad (3)$$

где  $B_{sea}$  – яркость восходящего от моря излучения;  $B_{sky}$  – яркость сопряженного участка неба;  $r$  – коэффициент отражения Френеля, принимающий значение 0,02 для штилевой погоды и при углах зондирования, близких к вертикали;  $B_{ws}$  – яркость белого отражателя. Поглощением и рассеянием света в воздухе пренебрегаем, так как речь идет о зондировании морской поверхности с борта судна.

На рис. 1 показаны спектры яркости, полученные на полигоне в северо-восточной части Черного моря в районе впадения в море р. Вулан в четырех точках по мере удаления судна от берега. Для определения КСЯ с борта судна использовался спектрофотометр фирмы AVANTES со спектральным диапазоном 360–760 нм, спектральным разрешением 5 нм, отношением сигнал-шум 1000 : 1 и временем интеграции от 0,1 до 60 с. Видно, что при сохранении общего характера спектров яркость измеряемых объектов сильно меняется из-за наличия облачности и сильного ветра, которые изменяют условия облученности при переходе от одного объекта к другому (так, из-за экранирования прямого солнечного света облаками яркость объектов меняется в 3–4 раза). Спектры КСЯ, полученные по этим измерениям, показаны на рис. 1, з.

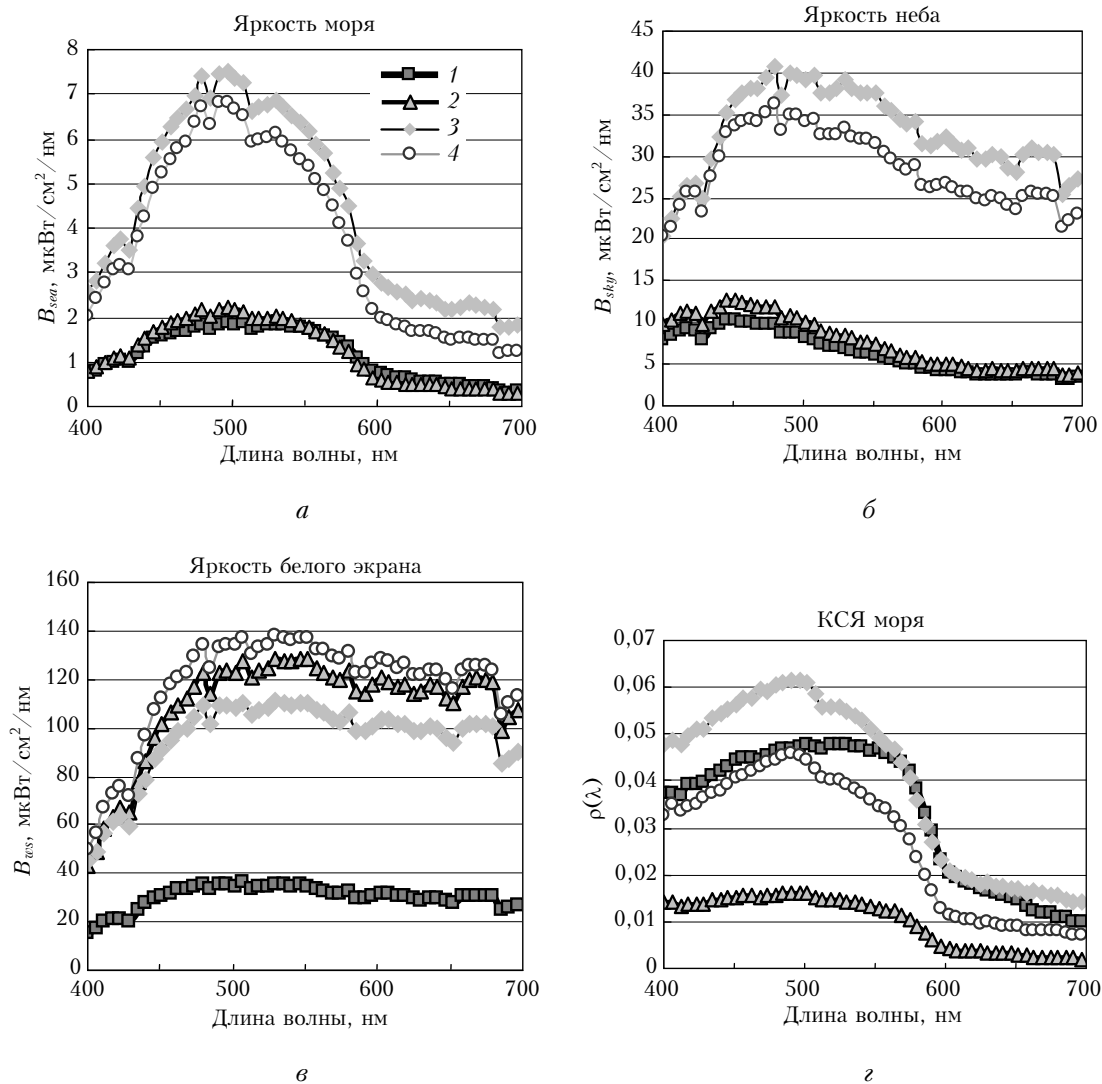


Рис. 1. Измеренные в диапазоне 400–700 нм спектры яркости излучения, восходящего от морской поверхности (а), спектры яркости участка неба, дающего основной вклад в отражение света от поверхности воды при измерении яркости моря (б), и яркость горизонтально расположенного белого матового экрана (в). Спектры КСЯ, рассчитанные по этим данным (г). Кривые 1–4 получены при удалении судна от берега

Погрешность измерения величины КСЯ в (3), вычисляемая по соотношению сигнал-шум прибора и с помощью обычных соотношений для погрешности суммы и частного от деления двух величин, равна приблизительно 1% в диапазоне 400–600 нм и возрастает при измерении малых величин в диапазоне 600–700 нм. Оценку погрешности измерения можно провести и непосредственно по полученным спектрам КСЯ, считая отклонения от средней линии на небольших участках спектра (~30 нм) результатом погрешности измерений. Видно (рис. 1, г), что абсолютная погрешность примерно одинакова по всему спектру (~0,001 для двух верхних кривых). Следовательно, относительная погрешность меняется от 2 до 5% и несколько больше в диапазоне 600–700 нм. Однако при дистанционном методе гораздо большую погрешность вносят измерения на ходу судна в условиях переменной облачности, при зна-

чительном волнении или быстроменяющихся оптических характеристиках исследуемой водной массы. Кроме того, при последовательном измерении яркости моря, неба и белого отражателя (данная работа как раз и иллюстрируется спектрами КСЯ, полученными этим способом) дополнительную погрешность вносит несинхронность всех трех отсчетов. В настоящее время нами разрабатывается опытный экземпляр трехканального спектрофотометра нового поколения для измерения спектра коэффициента яркости моря, который синхронно регистрирует все три упомянутые величины. Кроме того, предложенный здесь оригинальный метод калибровки позволяет, как будет показано ниже, даже при плохих погодных условиях и неполной синхронизации отдельных измерений получать удовлетворительные спектры, по которым можно оценивать концентрации примесей с борта движущегося судна.

## Калибровка спектров коэффициента яркости с использованием особенностей поглощения света чистой морской водой

Идея калибровки возникла при сравнении спектров КСЯ, полученных в различных морях. Была выявлена некоторая общая особенность спектров — наличие определенного изгиба в диапазоне 580–630 нм (он хорошо виден на рис. 1). В этом спектральном диапазоне поглощение и светорассеяние естественных морских примесей (хлорофилла, «желтого вещества» и взвеси) не имеют никаких особенностей. В то же время поглощение чистой

морской водой здесь, как правило, превосходит поглощение света примесями и возрастает с увеличением длины волны, причем как раз при 600 нм его рост скачком замедляется (рис. 2) [5, 24–26]. Эта особенность и послужила основой для проведения калибровки получаемых зависимостей КСЯ и расчета спектров поглощения воды.

Предложенный метод калибровки по поглощению чистой водой состоит из нескольких шагов-итераций. На первом шаге будем считать, что в диапазоне 580–700 нм показатель обратного рассеяния  $b_b$  не меняется с длиной волны, а значения показателей поглощения пигментами фитопланктона  $a_p$  и «желтым веществом»  $a_{ys}$  малы по сравнению с показателем поглощения чистой водой  $a_w$  и взвесью  $a_{sm}$ .

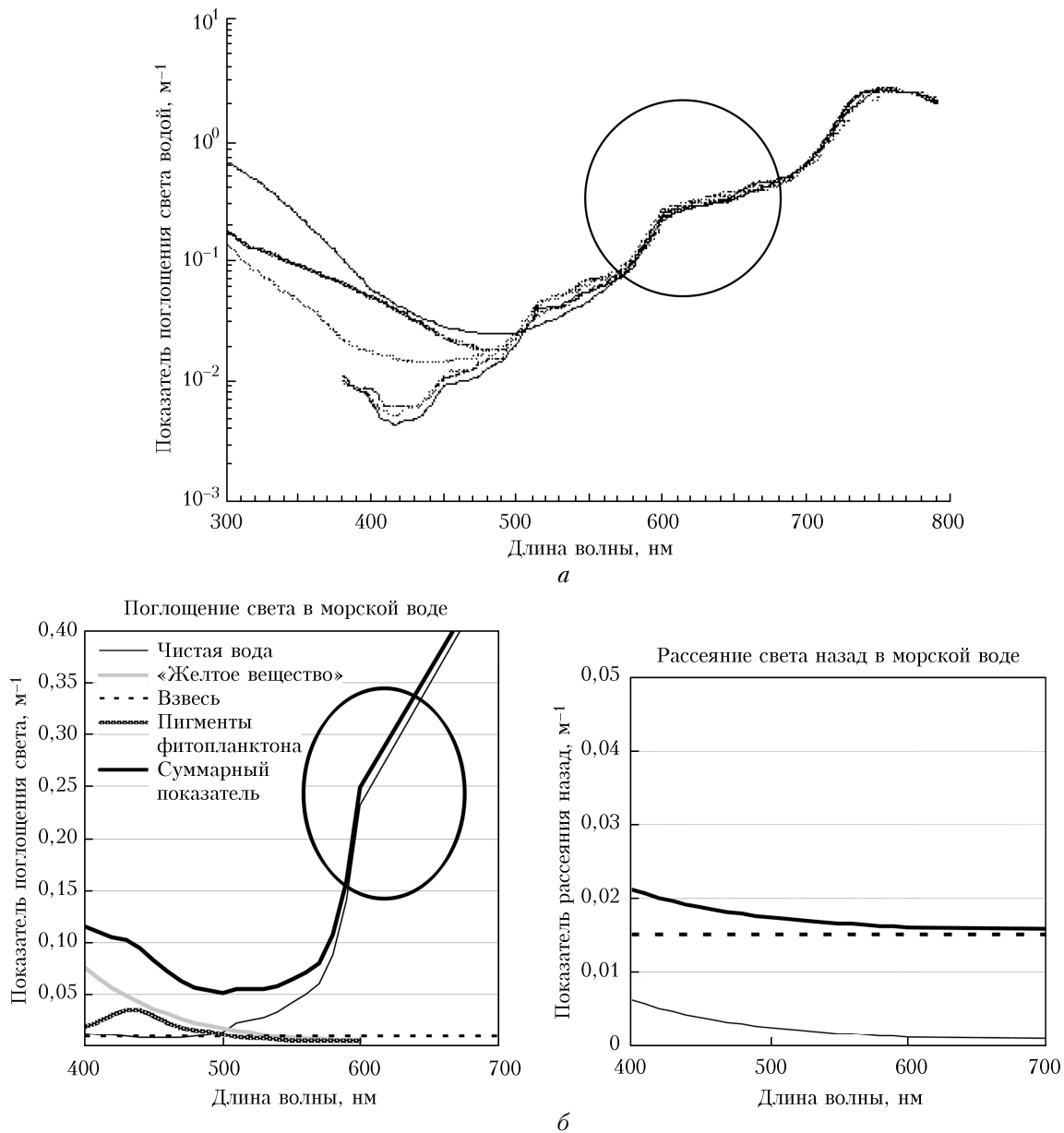


Рис. 2. Данные по спектру поглощения чистой морской водой [5]: в районе 600 нм происходит скачкообразное изменение зависимости поглощения от длины волны (а). Спектры поглощения и рассеяния назад воды и основных естественных примесей в морской воде — на 600 нм особенность имеет только поглощение воды (б)

Предположение о рассеянии верно для большей части прибрежных вод, так как в них рассеяние назад определяется в основном рассеянием на взвеси  $b_{sm}$ , а изменения спектрального хода зависят от рассеяния на флуктуационных неоднородностях воды  $b_w$ . В то же время поглощение света «желтым веществом» и пигментами фитопланктона в этом диапазоне длин волн значительно ниже поглощения чистой водой ( $\ll 0,1 \text{ м}^{-1}$ ). Тогда на первом шаге можно записать

$$b_b \approx b_{w600} + b_{sm} = b_{600} = \text{const}, \quad (4)$$

$$a_p, a_{ys} \ll a_w + a_{sm} \text{ при } 580 < \lambda < 700 \text{ нм.}$$

На первом шаге считаем, что разница в поглощении до «излома» на 600 нм и после него в этом диапазоне будет обеспечиваться только поглощением чистой морской водой, т.е. известна заранее:

$$\Delta_1 = a_{w700} - a_{w600}, \quad (5)$$

$$\Delta_2 = a_{w600} - a_{w580},$$

и можно записать

$$a_{700} = a_{600} + \Delta_1, \quad (6)$$

$$a_{580} = a_{600} - \Delta_2.$$

При этом надо отметить, что значения показателей поглощения не обязательно равны только поглощению чистой водой, а являются суммой поглощения чистой водой и взвесью (показатель поглощения последней считается постоянным, в противном случае методика калибровки должна быть уточнена).

Предположим, что в результате воздействия различных погодных факторов истинное значение КСЯ отличается от измеренного и может быть вычислено по формуле

$$\rho(\lambda) = kR(\lambda) - \Delta R, \quad (7)$$

где  $R(\lambda)$  — спектр, рассчитанный по результатам измерений;  $k$  и  $\Delta R$  — неизвестные коэффициенты. Предположения о неселективности коэффициента  $k$  и разности  $\Delta R$  в (7) сделаны при анализе возможных причин возникновения этих поправок. Так,  $k$ , отличный от единицы, возникает при изменении скачком общей освещенности, при этом относительное спектральное распределение не меняется (см. рис. 1, в), и, следовательно,  $k$  неселективен. Коэффициент  $\Delta R$ , отличный от нуля, возникает при неправильном отображении яркости неба, но она также меняется скачком, а частное от деления яркости неба на яркость белого отражателя в диапазоне 580–700 нм практически постоянно. Некоторая нелинейность здесь может возникнуть в районе 500 нм, и ее можно учесть при вычислении спектров поглощения, однако при наших измерениях величина  $\Delta R$  оказалась мала, и в первом приближении было принято решение считать ее постоянной. В дальнейшем при необходимости можно ввести эту поправку. Подставив в левую часть выражение (2) для КСЯ, получим

$$\frac{k_0 b_b}{a + b_b} = kR - \Delta R. \quad (8)$$

Учитывая соотношения (4)–(6), для красной области спектра можно записать систему уравнений для трех измеренных значений КСЯ на 580, 600 и 700 нм:

$$\begin{cases} \frac{1}{a_{600} + b_{600} - \Delta_2} = \frac{k}{k_0 b_{600}} R_{580} - \frac{\Delta R}{k_0 b_{600}}, \\ \frac{1}{a_{600} + b_{600}} = \frac{k}{k_0 b_{600}} R_{600} - \frac{\Delta R}{k_0 b_{600}}, \\ \frac{1}{a_{600} + b_{600} + \Delta_1} = \frac{k}{k_0 b_{600}} R_{700} - \frac{\Delta R}{k_0 b_{600}}. \end{cases} \quad (9)$$

Это система трех уравнений с тремя неизвестными:

$a_{600} + b_{600}$ ,  $\frac{k}{k_0 b_{600}}$  и  $\frac{\Delta R}{k_0 b_{600}}$ . Разрешая систему относительно этих неизвестных и подставляя их в (8), получаем оценку спектров величины, связанной с поглощением и рассеянием воды во всем диапазоне измерений (400–700 м):

$$\frac{a(\lambda) + b_b(\lambda)}{b_b(\lambda)/b_{600}} = \left[ \frac{k}{k_0 b_{600}} R(\lambda) - \frac{\Delta R}{k_0 b_{600}} \right]^{-1}. \quad (10)$$

Здесь необходимо отметить, что полученное выражение есть, фактически, оценка спектра поглощения воды для мезотрофных и эвтрофных вод, в основном встречающихся в шельфовых зонах, так как здесь рассеяние определяется рассеянием на взвеси, которое до некоторой степени можно считать независимым от длины волны в выбранном диапазоне. Действительно, считая  $b_b(\lambda) \approx b_{600} + \delta b_\lambda$ , где  $\delta b_\lambda \ll b_{600}$ , получим

$$\frac{a(\lambda) + b_b(\lambda)}{b_b(\lambda)/b_{600}} \approx a(\lambda) + b_{600} - a(\lambda) \left( \frac{\delta b_\lambda}{b_{600}} \right). \quad (11)$$

Пренебрегая третьим членом, можно заключить, что полученный спектр есть спектр поглощения воды плюс некоторая константа, отражающая среднее рассеяние назад.

На втором шаге итерации мы можем учесть поправки к величине разности показателей поглощения воды  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$ , вносимые «желтым веществом» и пигментами. Для этого оценим изменение поглощения примесями ( $a_{xyz}$ ) в спектре при переходе от 500 к 600 нм:

$$a_{xyz500} - a_{xyz600} = \left( \left[ \frac{k}{k_0 b_{600}} R(500) - \frac{\Delta R}{k_0 b_{600}} \right]^{-1} - a_{w500} \right) - (a_{600} + b_{600} - a_{w600}). \quad (12)$$

Считая, что суммарное поглощение «желтым веществом» и пигментами ( $a_{xy}$ ) в диапазоне 500–700 нм убывает с длиной волны по экспоненциальному закону, и принимая показатель этой экспоненты равным показателю экспоненты поглощения «желтого вещества»  $g = 0,015 \text{ нм}^{-1}$  [18], получим

$$a_{xy}(\lambda) = a_{xy500} \exp(-g(\lambda - 500)),$$

$$a_{xy500} = \frac{a_{xyz500} - a_{xyz600}}{1 - \exp(-g(600 - 500))}. \quad (13)$$

Расчет  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  по поглощению, состоящему на этом шаге уже из трех компонент (поглощение чистой водой, неселективное поглощение взвесью и суммарное поглощение «желтым веществом» и пигментами), выполняется по формулам

$$\Delta_1 = a_{w700} - a_{w600} + a_{xy500} \times (\exp[-g(700 - 500)] - \exp[-g(600 - 500)]), \quad (14)$$

$$\Delta_2 = a_{w600} - a_{w580} + a_{xy500} \times (\exp[-g(600 - 500)] - \exp[-g(580 - 500)]).$$

Далее решается система уравнений (9) с новыми значениями  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$ . Шаги-итерации продолжают до тех пор, пока отличие значения  $a_{xy500}$  на следующем шаге от предыдущего не станет меньше некоторой заданной величины. В табл. 1 даны значения, полученные в результате трех шагов-итераций по спектру КСЯ для измерений в четырех точках при удалении от берега. Видно, что на третьем шаге величина  $a_{xy500}$  отличается от предыдущего значения не более чем на 1%.

Таблица 1

**Оценка величины показателя поглощения пигментов фитопланктона и растворенной органики («желтого вещества») на 500 нм по трем итерациям для четырех станций**

Показатель поглощения, $m^{-1}$	Номер станции			
	1 (у берега)	2 (~0,7 км от берега)	3 (~1,5 км от берега)	4 (~2,2 км от берега)
$a_{xy 500}$ [I]	0,0388	0,0108	0,0094	0,0234
$a_{xy 500}$ [II]	0,0435	0,0122	0,0106	0,0263
$a_{xy 500}$ [III]	0,0441	0,0124	0,0108	0,0267

После проведения необходимого числа итераций подставляем полученные коэффициенты в (10) и получаем суммарный спектр поглощения морской воды плюс константы, соответствующей среднему рассеянию на взвеси. Вычитая из него известный спектр поглощения чистой морской воды, оцениваем спектр поглощения примесей. На рис. 3 приведены спектры, рассчитанные на четырех станциях при удалении от берега.

Видно, что в отличие от спектров КСЯ, которые трудно систематизировать, эти спектры поглощения изменяются упорядочено при удалении от берега (и от устья реки). Погрешность оценки спектров поглощения, рассчитанных с применением предложенной калибровки по формуле (10), можно оценить по самим спектрам (рис. 3) – относительная погрешность 5–7% (приблизительно столько же получается при оценке по формулам в предположении, что величина поглощения чистой морской воды известна с большей, чем при данных измерениях, точностью). Переходя к абсолютным погрешностям, получаем, что в диапазоне 400–580 нм они порядка  $0,005 m^{-1}$ , в то время как в диапазоне 600–

700 нм они достигают  $0,02 m^{-1}$ , так как величина самого поглощения здесь сильно возрастает (отметим, что при вычитании поглощения чистой воды величина абсолютной погрешности не уменьшается, поэтому при оценке концентраций примесей диапазон 600–700 нм мы исключаем!). Используя такие спектры, можно провести оценку концентрации основных примесей в морской воде.

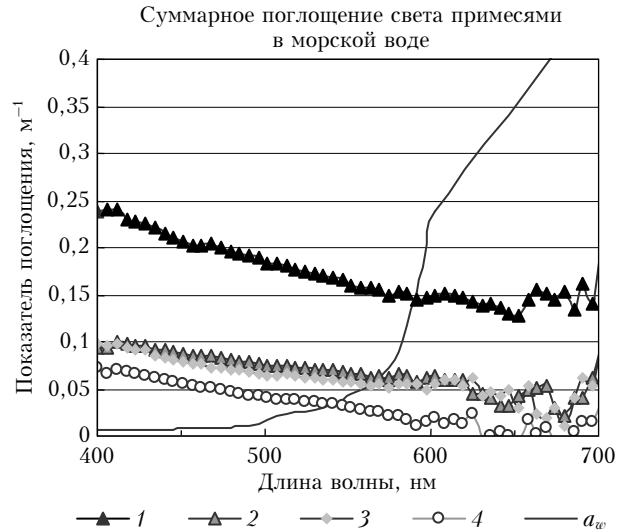


Рис. 3. Спектры поглощения морской воды, рассчитанные с применением предложенной калибровки по КСЯ, дистанционно измеренным на полигоне в районе устья р. Вулан с борта судна. Более темные линии соответствуют станциям ближе к берегу, тонкая линия – спектр поглощения чистой морской водой

## Оценка концентрации основных примесей в морской воде

Оценку концентрации основных природных примесей в морской воде проиллюстрируем на примере обработки спектра поглощения, полученного на ближайшем к берегу расстоянии на станции № 1 (табл. 2).

Основными светопоглощающими и светорассеивающими компонентами являются пигменты фитопланктона с максимумом поглощения на 430 нм, растворенная органика или «желтое вещество» плюс поглощение детритом, имеющие экспоненциально убывающий с длиной волны спектр, а также взвесь, поглощение и рассеяние которой считаем не зависящими от длины волны в диапазоне 400–700 нм. Для морских вод поглощение можно записать в виде [16]:

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + C_p a_p^*(\lambda) + a_{ys\lambda_0} \exp(-g(\lambda - \lambda_0)) + a_{sm}. \quad (15)$$

Здесь  $a_w(\lambda)$  – показатель поглощения чистой морской водой (водой без примесей);  $a_{sm}$  – показатель поглощения света взвешенными в морской воде частицами (для широкого круга задач можно считать, что поглощение и рассеяние взвесью не зависят от длины волны в рассматриваемом диапазоне);

Оценка концентрации пигментов фитопланктона, «желтого вещества» и взвеси в морской воде по спектрам поглощения, рассчитанным по дистанционно измеренным с борта судна КСЯ. Для сравнения курсивом приведены значения, измеренные в пробах воды

Концентрация	Номер станции				Диапазон значений в пробах
	1 (у берега)	2 (~0,7 км от берега)	3 (~1,5 км от берега)	4 (~2,2 км от берега)	
$C_p$ , мг/м <sup>3</sup>	1,35 <i>0,4</i>	0,45 <i>0,9</i>	0,45 <i>0,6</i>	0,6 <i>0,5</i>	<i>0,4–0,9</i>
$a_{ys\ 500}$ , м <sup>-1</sup>	0,012 <i>0,04</i>	0,007 <i>0,02</i>	0,007 <i>0,02</i>	0,008 <i>0,005</i>	<i>0,005–0,04</i>
$a_{sm} + b$ , м <sup>-1</sup>	0,14 <i>0,02</i>	0,06 <i>0,008</i>	0,05 <i>0,009</i>	0,015 <i>0,004</i>	<i>0,004–0,02</i>

$C_p$  и  $a_p^*(\lambda)$  – концентрация и удельный показатель поглощения пигментами, содержащимися в фитопланктоне;  $a_{ys\lambda_0}$  – показатель поглощения на длине волны  $\lambda_0$  окрашенным растворенным органическим веществом (так называемым «желтым веществом»), а также детритом (окрашенная органика во взвеси), содержащимися в морской воде;  $g$  – показатель, принимающий значения 0,011–0,02 нм<sup>-1</sup>, здесь  $g = 0,015$  нм<sup>-1</sup>,  $\lambda_0 = 500$  нм. Для всех этих величин здесь и далее подразумеваются средние значения по толщине поверхностного слоя воды, куда проникает солнечное излучение.

Задавая удельные спектры поглощения основных примесей по имеющимся данным [4, 5], можно рассчитать спектр поглощения морской воды при разных концентрациях примесей и сравнить его с полученным по КСЯ спектром поглощения. Варьируя величину концентраций, подбираем значения, при которых отклонение двух кривых друг от друга минимально (например, методом наименьших квадратов). Сравнение кривых проводится в диапазоне 400–600 нм, так как в более длинноволновом диапазоне значения поглощения получаются с большим разбросом, обусловленным малыми значениями КСЯ, сравнимыми с флуктуациями сигнала. На рис. 4 показан результат этой операции: приведены результирующие модельные кривые поглощения пигментами фитопланктона, «желтого вещества» и взвеси и суммарный модельный спектр, хорошо совпадающий со спектром поглощения, рассчитанным по КСЯ.

По найденным спектрам поглощения примесей были рассчитаны их концентрации (для расчета концентрации пигментов фитопланктона была использована эмпирическая зависимость концентрации от максимума поглощения на 430 нм, полученная на пробах в этом же эксперименте, концентрации «желтого вещества» и взвеси определялись по поглощению на 500 нм). Здесь важно подчеркнуть, что все оценки получены без предположения о наличии какой-либо корреляции между концентрациями фитопланктона, растворенной органики («желтого вещества») и взвеси, что является необходимым условием при работе в шельфовых водах (водах типа 2).

Моделирование спектров поглощения света основными примесями в морской воде

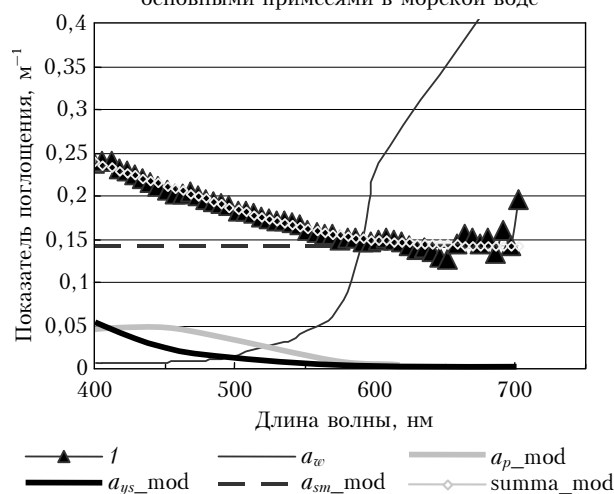


Рис. 4. Оценка концентрации основных природных примесей в морской воде по спектру поглощения (станция № 1). Спектр поглощения примесями, полученный по спектру КСЯ, дан темными треугольниками. Результаты расчета поглощения света природными примесями (фитопланктоном, «желтым веществом» и взвесью) с наиболее вероятными концентрациями показаны линиями различной толщины и цвета:  $a_{p\_mod}$  – спектр поглощения пигментами фитопланктона;  $a_{ys\_mod}$  – поглощение «желтым веществом»;  $a_{sm\_mod}$  – поглощение взвесью. Их суммарный спектр выделен светлыми ромбами

Проведя аналогичные расчеты для всех станций, получаем таблицу значений средних по просвечиваемому Солнцем слою концентраций основных примесей. При удалении от берега значения концентраций всех трех примесей имеют тенденцию к уменьшению. Для сравнения в таблице приводятся также результаты определения концентраций на пробах воды, взятых с поверхности. Погрешность оценки концентрации примесей рассчитывалась путем вариации значений каждой из полученных величин концентраций около посчитанных средних, при этом выбиралось то значение, при котором среднеквадратическое отклонение новой модельной кривой от измеренных спектров отличалось от отклонения наилучшей модельной кривой не более

чем на величину погрешности измерений для измеренных спектров.

Проведенные расчеты позволили сделать вывод, что погрешности оценки концентрации фитопланктона и взвеси равны примерно 30%, в то время как оценка концентрации «желтого вещества» — около 40%. Здесь необходимо сделать два замечания: во-первых, эти оценки применимы только для мезотрофных и эвтрофных вод; во-вторых, результаты сравнения с измерениями на пробах воды никак не опровергают полученный результат, так как наш метод позволяет оценивать концентрации, средние по просвечиваемому Солнцем слою, а пробы воды брались с поверхности (здесь интересно сравнить тенденции изменения концентрации). Видно, что значения концентраций пигментов фитопланктона, полученные разными методами, близки, кроме значений станции № 1, расположенной у берега в месте впадения реки. Здесь, очевидно, речная вода не перемешалась с морской водой, и оценки по пробам воды, взятым с поверхности, не совпадают с оценками среднего поглощения по всей глубине проникновения света. Концентрации «желтого вещества», полученные по спектрам поглощения, несколько уменьшаются при удалении от берега. Аналогичные оценки на пробах дают больший разброс значений в связи с тем, что они относятся к приповерхностному слою, однако по порядку величины и общей тенденции они совпадают с оценками по спектру. Значения концентрации взвеси, полученные по спектрам и на пробах, сильно различаются. Возможно, это следствие быстрого оседания взвеси. В то же время тенденция уменьшения количества взвеси при удалении от берега здесь прослеживается в обоих случаях.

## Обсуждение результатов

Итак, показано, что КСЯ верхнего слоя моря, получаемый по измерениям с борта судна, является очень информативной характеристикой состава морской воды. Для его измерения может быть использован трехканальный спектрофотометр, обладающий малыми габаритами и массой и не требующий особых условий питания. Кроме того, так как измерения пассивные и дистанционные и не требуют специальных остановок, они могут проводиться с борта движущегося судна.

Однако получаемые спектры КСЯ сильно зависят от условий съемки, что, очевидно, и является причиной того, что этот метод определения характеристик водной толщи не получил широкого распространения. В связи с этим предложенный нами метод калибровки спектров КСЯ, получаемых в сложных метеорологических условиях (при облачности и ветре), существенно расширяет возможности использования пассивного дистанционного измерения КСЯ с борта судна. Калибровка основана на использовании свойств поглощения чистой морской воды в диапазоне 580–700 нм. Метод удобен тем, что в этом диапазоне поглощение всех основных примесей не имеет особенностей и, как

правило, мало, в то время как необходимые значения поглощения самой воды достаточно велики и измерены с хорошей точностью.

Другой особенностью метода является то, что в результате калибровки удается восстановить спектры поглощения света морской водой. Используя эти спектры и известные спектры удельного поглощения света основными содержащимися в воде примесями, можно оценить концентрации этих примесей. При этом существенно, что все оценки получаются без предположения о наличии какой-либо корреляции между концентрациями фитопланктона, растворенной органики («желтого вещества») и взвеси, что является ключевым моментом при работе в водах шельфа или в акваториях внутренних морей (водах типа 2).

Проведение измерений в зоне впадения рек у побережья Черного моря позволило проверить предложенные методики измерения КСЯ трехканальным спектрофотометром, калибровки найденных спектров с получением спектров поглощения и оценки концентраций примесей в прибрежных водах. Полученные концентрации сравнивались с результатами определения концентраций на пробах воды, взятых в том же эксперименте. Корреляция этих оценок позволяет сделать вывод о возможности определения состава прибрежных вод с помощью дистанционного метода измерения КСЯ с борта судна.

## Заключение

Включение нового метода калибровки, описанного в работе, в цепочку «пассивные дистанционные измерения КСЯ моря — калибровка спектров с получением спектров поглощения примесей — оценка состава морской воды» делает весь процесс более надежным и менее зависимым от условий съемки.

Так как съемка может проводиться с борта движущегося судна, предложенный метод удобно применять в случае необходимости картирования распределения примесей в прибрежных районах морей. Кроме того, он может быть полезен при проведении подспутниковых измерений, особенно для отечественных спутников с мультиспектральной оптической аппаратурой на борту.

Автор выражает благодарность Б.В. Коновалову за предоставленные результаты измерений на пробах воды и Д.В. Хлебникову за проведение измерений спектрофотометром.

Работа выполнялась по гранту РФФИ 14-17-00382 («Гидрофизические основы мониторинга и прогноза загрязнений на российском шельфе Черного моря»).

1. Morel A., Prieur L. Analysis of variations in ocean color // *Limnol. Oceanogr.* 1977. V. 22, N 4. P. 709–722.
2. Prieur L., Sathendranath S. An optical classification of coastal and oceanic waters based on the specific spectral absorption curves of phytoplankton pigments, dissolved organic matter and other particulate materials // *Limnol. Oceanogr.* 1981. V. 26, N 4. P. 671–689.



3. *Оптика океана*. Т. 1 / Под ред. А.С. Монина. М.: Наука, 1983. 372 с.
4. *Пелевин В.Н.* Оптические явления на поверхности океана // Явления на поверхности океана / Под ред. А.С. Монина и В.П. Красицкого. Л.: Гидрометеоздат, 1985. С. 318–329.
5. *Wozniak B., Dera J.* Light Absorption in Sea Water. N.Y.: Springer Science + Business Media, LLC, 2007. 454 p.
6. *Копрова Л.И., Коновалов Б.В., Пелевин В.В., Пелевин В.Н., Хлебников Д.В.* Изменчивость комплексов оптических и гидрологических параметров поверхностных вод Атлантического океана // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2010. Т. 46, № 2. С. 212–227.
7. *Шаманаев В.С., Пеннер И.Э., Крекова М.М., Коханенко Г.П., Саафифар М.Х.* Гидрооптическое лазерное зондирование в контролируемых условиях // Изв. вузов. Физ. 2005. Т. 48, № 12. С. 34–39.
8. *Bowers D.G., Binding C.E.* The optical properties of marine suspended particles: A review and synthesis // Estuarine, Coastal Shelf Sci. 2006. V. 67. P. 219–230.
9. *Wozniak B., Ostrowska M.* Optical absorption properties of phytoplankton in various seas // Oceanologia. 1990. N 29. P. 117–146.
10. *Коновалов Б.В., Матюшенко В.А., Пелевин В.Н., Ростовцева В.В., Лещев А.В., Хлебников Д.В.* Концентрация «желтого вещества» и компонентов сестона в водах Белого моря и их вклад в светопоглощение // Опыт системных океанологических исследований в Арктике. М.: Научный мир, 2001. С. 409–417.
11. *Morel A.* Optical modelling of the upper ocean in relation to its biogenous matter content (case 1 waters) // J. Geophys. Res. C. 1988. V. 93, N 9. P. 10749–10768.
12. *Пелевин В.Н., Ростовцева В.В.* Определение концентрации примесей в морской воде по спектру восходящего солнечного излучения // Оптика атмосфер. и океана. 1996. Т. 9, № 12. С. 1653–1658.
13. *Babin M., Morel A., Fourmier-Sicre V., Fell F., Stramski D.* Light scattering properties of marine particles in coastal and open ocean waters as related to the particle mass concentration // Limnol. Oceanogr. 2003. V. 48, N 2. P. 843–859.
14. *Буренков В.И., Гольдин Ю.А., Кравчишина М.Д.* Распределение концентрации взвеси в Карском море в сентябре 2007 г. по судовым и спутниковым данным // Океанология. 2010. Т. 50, № 5. С. 842–849.
15. *Kopelevich O.V., Goldin Y.A., Artemiev V.A., Shatravin A.V.* Optical structure of the Kara Sea waters from data of the ship measurements in 2011 // Proc. VII Intern. Conf. "Current Problems in Optics of Natural Waters (OWN'2013)". St.-Peterburg: Nauka, 2013. P. 67–71.
16. *Матюшенко В.А., Пелевин В.Н., Ростовцева В.В.* Измерение коэффициента яркости моря трехканальным спектрофотометром с борта НИС // Оптика атмосфер. и океана. 1996. Т. 9, № 5. С. 664–669.
17. *Mobley C.D.* Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements // Appl. Opt. 1999. V. 38, N 36. P. 7442–7455.
18. *Pelevin V.N., Rostovtseva V.V.* Estimation of "yellow substance" concentration in sea water by various contact and remote measurements data // Proc. SPIE. 2000. V. 4341. P. 459–465.
19. *Пелевин В.Н., Ростовцева В.В., Попов И.К.* О спектральной яркости моря вблизи Антарктиды и возможности дистанционного определения концентрации хлорофилла и «желтого вещества» // Мат-лы IV Международ. научно-технич. конф. «Современные методы и средства океанологических исследований» (МСОИ-2000). 2000. Ч. 1. С. 243–254.
20. *Hommersom A., Kratzer S., Laanen M., Ansko I., Ligi M., Bresciani M., Giardino C., Beltrán-Abaunza J.M., Moore G., Wernand M., Peterset S.* Intercomparison in the field between the new WISP-3 and other radiometers (TriOS Ramses, ASD FieldSpec, and TACCS) // J. Appl. Remote Sens. 2012. V. 6, N 1. P. 063615-1–063615-21.
21. *Артемьев В.А., Буренков В.И., Возняк С.Б., Григорьев А.В., Дарецкий М.А., Демидов А.А., Копелевич О.В., Французов О.Н., Храпко А.Т.* Подспутниковые измерения цвета океана: натурный эксперимент в Черном и Эгейском морях // Океанология. 2000. Т. 40, № 2. С. 192–198.
22. *Binding C.E., Bowers D.G., Mitchelson-Jacob E.G.* An algorithm for the retrieval of suspended sediment concentrations in the Irish Sea from SeaWiFS ocean colour satellite imagery // Int. J. Remote Sens. 2003. V. 24, N 19. P. 3791–3806.
23. *Копелевич О.В., Буренков В.И., Шеберстов С.В., Прохоренко О.В.* Разработка региональных алгоритмов атмосферной коррекции спутниковых данных о цвете океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 1, вып. 6. С. 400–408.
24. *Tyler J.E., Smith R.C., Wilson W.H.* Predicted optical properties for clear natural water // J. Opt. Soc. Amer. 1972. V. 62, N 1. P. 83–91.
25. *Копелевич О.В.* Оптические свойства чистой воды в спектральной области 250–600 нм // Оптика и спектроскопия. 1976. Т. 41, вып. 4. С. 666–668.
26. *Pope R.M., Fry E.S.* Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. Integrating cavity measurements // Appl. Opt. 1997. V. 36, iss. 33. P. 8710–8723.

**V.V. Rostovtseva. Method of estimation of sea water absorption spectra from data of passive remote sensing from board a ship using pure sea water properties.**

An original method for calibration of spectra of the seawater surface radiance coefficient measured from board a moving ship with a three-channel optical spectrophotometer is proposed. The method is based on some peculiarities of pure sea water absorption. By this method application, the spectra of the sea water absorption can be obtained. Some results of processing of measurements in the aquatorium of the Russian Black Sea coast at river mouths are given. The efficiency of the calibration method application for radiance spectra measured under the impact of considerable cloudiness and wind is demonstrated. After the absorption spectra were obtained, the concentrations of the main natural seawater admixtures were estimated and compared with the direct measurements of water samples. It is shown that the developed method of sea water content estimation, which includes remote sensing of sea radiance coefficient from board a ship, calibration method with sea water absorption spectra determination, and estimation of the main sea water admixtures concentration, can be used for investigation of shelf and inland sea aquatoria because it does not imply any correlation between phytoplankton, dissolved organic matter ("yellow substance"), and suspended matter concentrations.