

УДК 551.465

СПОСОБ ОЦЕНКИ СОДЕРЖАНИЯ ПРИМЕСЕЙ В МОРСКИХ ВОДАХ С ПОМОЩЬЮ ОПЕРАТИВНОЙ СПЕКТРОФОТОМЕТРИИ

© 2017 г. В. В. Ростовцева, Б. В. Коновалов, И. В. Гончаренко, Д. В. Хлебников

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия**e-mail: vera@ocean.ru*

Поступила в редакцию 20.05.2014 г.

После доработки 24.06.2016 г.

В работе рассмотрены спектры коэффициента яркости водной поверхности, измеренные как в открытом океане, так и в прибрежных водах, и выделены различные формы спектров в зависимости от типа вод. Основное внимание уделено методу измерения коэффициента яркости с борта движущегося судна с помощью гиперспектрального спектрофотометра. Представлены результаты исследования прибрежной акватории российского побережья Черного моря в районе влияния стока рек. Предложен и апробирован новый метод калибровки, позволяющий обрабатывать результаты измерений с поправками на воздействие облачности и ветра. По полученным спектрам оценены концентрации основных примесей в морской воде исследуемой акватории и проведено сравнение этих оценок с результатами прямого анализа взятых проб воды. Показано, что метод дистанционного измерения коэффициента яркости моря с борта судна позволяет получать оперативные карты пространственного распределения основных примесей.

DOI: 10.7868/S0030157417040050

1. 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 [15, 16, 18, 30, 31, 36, 38].

При сравнении пассивных и активных методов получения данных о концентрации примесей в морской воде надо отметить, что более надежными являются пассивные методы. Действительно, активные методы исследования (как контактные, так и дистанционные), основанные на возбуждении флуоресценции и регистрации флуоресцентного отклика, используют связь между интенсивностью флуоресценции и количеством какой-либо примеси, однако эта связь сложна и неоднозначна. Причиной тому является изменчивость удельной флуоресценции исследуемого компонента. Так, величина удельной флуоресценции фитопланктона зависит от его физиологического состояния, видового состава водорослей и имеет суточный ход, а удельная

флуоресценция окрашенного растворенного органического вещества, так называемого “желтого вещества”, зависит от его фракционного состава [6, 32]. 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 водой с концентрацией примесей более тесная и ее можно считать практически однозначной.

Одной из наиболее привлекательных 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 [18, 19, 20, 36, 40]. Дистанционное измерение этого спектра с борта судна, однако, затруднено, так как необходимо выделять сигнал, идущий из толщи воды, на фоне отраженного поверхностью солнечного света. Подповерхностный спектрофотометр, измеряющий подповерхностную облученность и восходящее из толщи воды излучение, для своей работы требует погружения прибора на станциях [3, 4, 29]. Для решения задачи дистанционного измерения КСЯ был

разработан трехканальный спектрофотометр и получены спектры с борта НИС [17]. Однако во многих случаях технические ограничения использованного при этом спектрофотометра не позволяли получать качественные спектры, что затрудняло оценку состава морской воды по этим данным. Спектрофотометр, с помощью которого производились измерения в Черном море, описанные в данной работе, построен на новой элементной базе (с матрицей приемников вместо ФЭУ), позволяющей получать более качественные спектры. Кроме того, предложенный метод калибровки снимает жесткие требования к метеорологическим условиям, при которых можно получать удовлетворительные результаты.

Особую ценность спектры коэффициента яркости морской воды приобретают в том случае, когда необходимо разработать или уточнить региональный алгоритм дешифрирования спутниковой информации, относящейся к конкретному морскому водоему и определенному сезону [1, 2, 14, 15, 25, 28, 29]. При этом, помимо минимально необходимых данных судовых измерений характеристик водной среды (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.

В настоящее время для вод типа 1 (воды открытого океана) уже разработан алгоритм дешифрирования спутниковой информации, который позволяет с приемлемой точностью оценивать концентрацию фитопланктона, “желтого вещества” и взвеси [27, 30, 34, 37]. При мониторинге вод типа 2 (во внутренних морях и прибрежных акваториях) [24] необходимо использовать упомянутые выше региональные алгоритмы [9, 10, 22, 23, 26].

Для сбора количества информации, достаточного для разработки регионального алгоритма дешифрирования в водах типа 2, учитывая большую пространственную и временную изменчивость их характеристик, необходимо использовать оперативные методы пассивного 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 данной работе рассмотрены спектры КСЯ водной поверхности как в открытом океане, так и в прибрежных водах и выделены различные типы спектров в зависимости от типа вод. Описан метод измерений КСЯ с борта движущегося судна с помощью гиперспектрального спектрофотометра и представлены результаты исследования прибрежной акватории российского побережья Черного моря в приустьевых районах. Предложен и апробирован

новый метод калибровки, позволяющий проводить расчеты по спектрам с поправкой на воздействие облачности и ветра при измерениях. По полученным спектрам оценены концентрации основных примесей в морской воде в районе исследования.

2. ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРОВ КСЯ В РАЗЛИЧНЫХ ВОДАХ

Получим форму спектров КСЯ для вод различного типа и состава, считая, что поглощение и рассеяние света определяется чистой водой и тремя известными примесями – фитопланктоном, определяемым по пигментам хлорофилла, “желтым веществом” и серой взвесью. КСЯ определяется как отношение яркости излучения B_w , выходящего из водной толщи, к яркости горизонтальной идеально рассеивающей поверхности B_o , характеризующей облученность водной поверхности Солнцем:

$$\rho(\lambda) = B_w(\lambda)/B_o(\lambda), \quad (1)$$

где λ – длина волны. 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 всему просвечиваемому Солнцем слою, в котором формируется восходящая яркость), можно получить выражение для КСЯ, связанное с оптическими характеристиками вод [18, 19]:

$$\rho(\lambda) = k_o b_b(\lambda)/(a(\lambda) + b_b(\lambda)), \quad (2)$$

где $b_b(\lambda)$ – показатель обратного рассеяния водной толщи, $a(\lambda)$ – показатель поглощения воды, $k_o = 0,17$. Для морских вод рассеяние и поглощение можно записать в виде [19]:

$$\begin{aligned} b_b(\lambda) &= b_{bw}(\lambda) + b_{sm}; \\ a(\lambda) &= a_w(\lambda) + C_p a_p^*(\lambda) + \\ &+ a_{ys} \exp(-g(\lambda - \lambda_o)) + a_{sm}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $b_{bw}(\lambda)$ и $a_w(\lambda)$ – показатели рассеяния назад и поглощения чистой морской водой (водой без примесей), b_{sm} и a_{sm} – показатели обратного рассеяния и поглощения света взвешенными в морской воде частицами (для широкого круга задач можно считать, что поглощение и рассеяние взвесью не зависит от длины волны в рассматриваемом диапазоне 400–700 нм), C_p и $a_p^*(\lambda)$ – концентрация и удельный показатель поглощения пигментами, содержащимися в фитопланктоне; a_{ys} – показатель поглощения на длине волны λ_o окрашенным растворенным органическим веществом, а также детритом (окрашенной органикой во взвеси), содержащимися в морской воде, g – показатель, принимающий значения $0,011 \div 0,02 \text{ нм}^{-1}$ [23, 38] (здесь $g = 0,015 \text{ нм}^{-1}$, $\lambda_o = 500 \text{ нм}$). Для всех этих

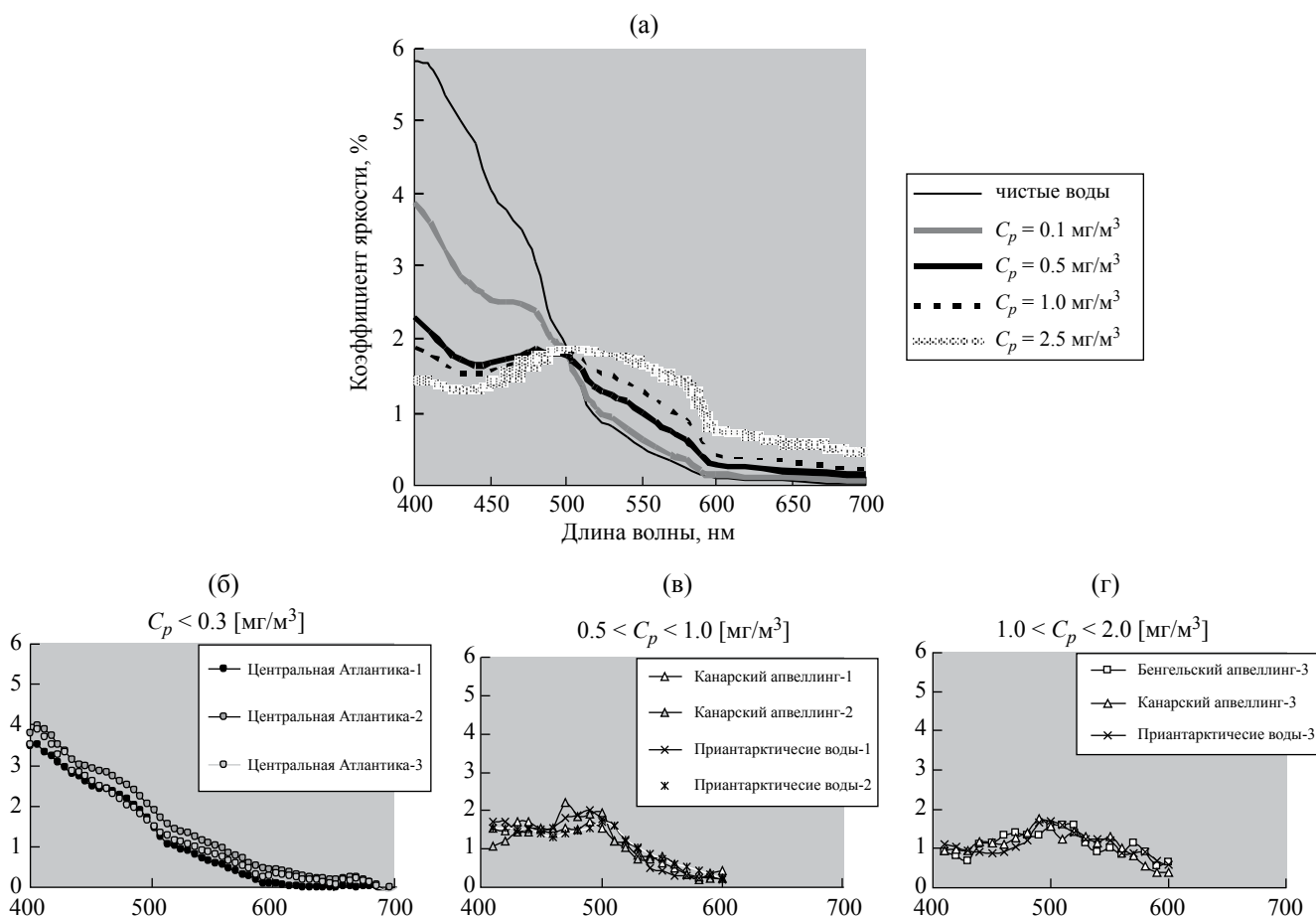


Рис. 1. Моделирование (а) и измерения (б, в, г) КСЯ вод с различным содержанием фитопланктона в водах открытого океана (воды типа I: О – олиготрофные с C_p до 0.3 мг/м^3 , М – мезотрофные при $0.3 < C_p < 2 \text{ мг/м}^3$ и Е – эвтрофные при $C_p > 2 \text{ мг/м}^3$). Спектры КСЯ измерены в центральной Атлантике (кружки) в 19-м рейсе НИС “Академик Иоффе”, а также в Канарском (треугольники) и Бенгельском (квадраты) апвеллингах и в приантарктических водах (кресты) (данные из [21]).

величин здесь и далее подразумеваются средние значения по толще поверхностного слоя воды, куда проникает солнечное излучение.

Задавая удельные спектры поглощения и рассеяния водой и ее основными примесями по имеющимся данным [11, 36, 38, 39, 40], можно рассчитать поглощение и рассеяние света морской водой при разных концентрациях примесей и получить особенности спектров КСЯ в различного типа водах. Как известно, в открытом океане содержание основных примесей определяется в первую очередь жизнедеятельностью фитопланктона. Используя зависимости концентрации “желтого вещества” и взвеси от концентрации фитопланктона, полученные для открытых вод [30, 34], мы рассчитали спектры КСЯ для вод с различным содержанием фитопланктона (рис. 1а). Видно, что спектры КСЯ открытого океана характеризуются некоторым провалом на 440 нм, что соответствует пику

поглощения хлорофилла, стабильными значениями на 500 нм (1.5–2.0%) и незначительным увеличением значений в диапазоне 500–600 нм по сравнению со спектром чистой морской воды. Измерения спектров КСЯ в олиготрофных водах Атлантического океана и в мезотрофных водах Канарского и Бенгельского апвеллингов, а также у берегов Антарктиды подтвердили полученные закономерности (рис. 1б – 1г) [11, 12, 21, 33].

В водах прибрежных районов, в районах впадения в море рек, а также во внутренних морях спектры КСЯ могут существенно отличаться от вышеприведенных, так как пропорции между концентрациями основных естественных примесей нарушаются. На рис. 2 приведены такие спектры, рассчитанные для вод с содержанием пигментов фитопланктона 0.5 мг/м^3 – это мезотрофные воды (М). При увеличении содержания “желтого вещества” в шельфовых водах, вызванного, например, стоком рек, значения КСЯ уменьшаются с уменьшением

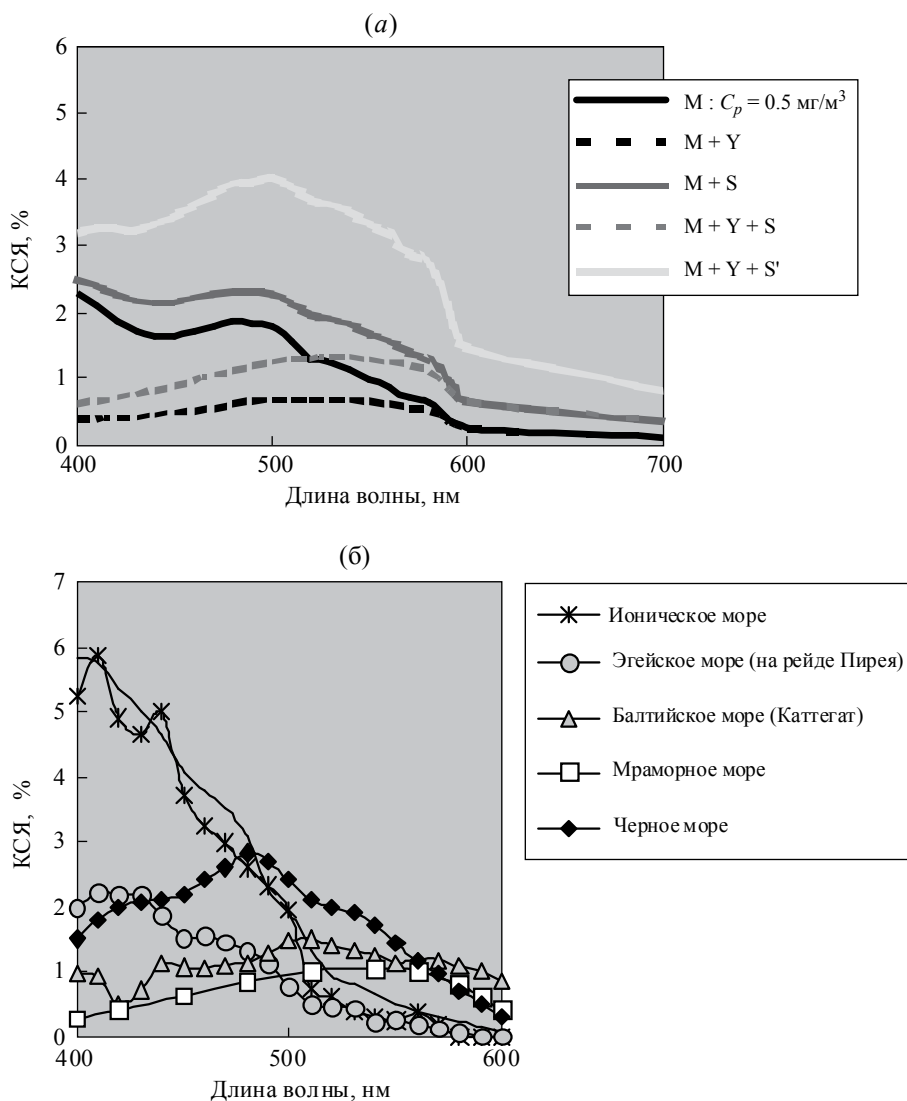


Рис. 2. Моделирование спектров КСА (а) для мезотрофных вод открытого океана с концентрацией фитопланктона $C_p = 0.5 \text{ мг/м}^3$, концентрацией “желтого вещества” $a_{ys500} = 0.004 \text{ м}^{-1}$ и концентрацией взвеси $a_{sm} = 0.014 \text{ м}^{-1}$ (М) и для вод типа 2 с той же концентрацией фитопланктона, но с добавочным содержанием “желтого вещества” (Y: $a_{ys500}^+ = 0.08 \text{ м}^{-1}$) и взвеси (S: $a_{sm}^+ = 0.04 \text{ м}^{-1}$, $b_{sm} = 0.2 a_{sm}$ или S': $a_{sm}^+ = 0.04 \text{ м}^{-1}$, $b_{sm} = 0.5 a_{sm}$). Спектры КСА (б), измеренные трехканальным спектрофотометром в 54-м рейсе НИС “Академик Курчатов” в морях, омывающих Европу.

длины волны в диапазоне 400–600 нм – это мезотрофные воды с увеличенной концентрацией “желтого вещества” (M + Y). В водах, где количество “желтого вещества” определяется фитопланктоном, как в открытом океане, а количество взвеси превышает соответствующую величину для океанических вод, например, в результате сильного шторма на мелководье, значения КСА становятся выше, чем в открытом океане, во всем диапазоне длин волн – это мезотрофные воды с увеличенной концентрацией взвеси (M + S). При высоком содержании в воде растворенной органики и взвешенных частиц (тип M + Y + S) форма спектра определяется показателем поглощения “желтого вещества”, однако значения

могут быть выше, чем для вод только с увеличенной концентрацией “желтого вещества”. Все вышеприведенные спектры рассчитывались при условии, что обратное рассеяние и поглощение света взвесью связаны таким же коэффициентом пропорциональности, как и в открытом океане (~0.2) [34]. Если же показатель рассеяния назад взвесью больше, то характерный вид спектра КСА меняется (тип M + Y + S'): значения коэффициента возрастают более всего там, где общее поглощение минимально.

Необходимо отметить, что все многообразие типов вод в шельфовых зонах можно отнести к одному из указанных здесь типов при условии, что основные

примеси – те же, что и в океане (разумеется, с учетом трофности вод: О (олиготрофные), М (мезотрофные) или Е (эвтрофные) в обозначениях проставляются на первом месте). И для каждого типа можно рассчитать характерный спектр КСЯ. Измеренные нами спектры подтверждают этот вывод. На рис. 26 представлены спектры КСЯ, полученные нами с использованием трехканального спектрофотометра в 54-м рейсе НИС “Академик Курчатов” (ИО РАН) в различных морях, омывающих Европу [17, 20, 33]. Видно, что воды Ионического моря, практически не содержащие примесей, близки по спектру к чистым морским водам. К таким водам можно было бы отнести и воды Эгейского моря, однако в спектре, измеренном на рейде при входе в Пирейский порт, значения КСЯ занижены в зеленой и синей областях спектра по сравнению с модельными спектрами для открытого океана – по-видимому, здесь содержится некоторое избыточное количество растворенной органики. Спектры КСЯ, измеренные в проливе Каттегат и в Мраморном море на рейде Стамбула, указывают на наличие большого количества растворенной органики и взвеси (особенно в проливе Каттегат). Спектры КСЯ в Черном море существенно отличаются от других типов спектров и указывают на наличие взвеси с более высоким показателем рассеяния назад.

Проведенные исследования подтверждают тот факт, что спектры КСЯ являются эффективным инструментом при оценке состава морских вод. Однако измерение их с борта судна сопряжено с определенными трудностями, связанными с наличием облачности и ветра. Для получения надежных результатов был предложен оригинальный метод калибровки, опробованный на полигоне в Черном море.

3. ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРОВ КОЭФФИЦИЕНТА ЯРКОСТИ В ПРИБРЕЖНЫХ ВОДАХ ЧЕРНОГО МОРЯ

В работе представлены результаты картирования района впадения в море реки Вулан в северо-восточной части Черного моря по данным пассивного оптического зондирования поверхности воды, по данным исследования проб воды, взятых на станциях, а также ADCP-зондирования 7 июня 2006 г. Для определения КСЯ с борта судна использовался спектрофотометр фирмы AVANTES (AvaSpec-102). Этот прибор имеет следующие основные характеристики: спектральный диапазон – 360–760 нм, спектральное разрешение – 5 нм, отношение сигнал/шум – 1000 : 1, время интеграции – от 0.1 до 60 с. Схема измерений дана на рис. 3а. Прибор имеет один вход, к нему присоединено обычное устройство для ввода излучения – волокно с линзой, угол зрения 5 град. Для определения КСЯ 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. Для измерения трех яркостей поворачивали волокно, как и показано на схеме. Измерения проводились под углом порядка 10–15 град от вертикали вниз, чтобы не попасть в тень от борта и не попадалась пена (море и белый экран), и 10–15 град от вертикали вверх (небо). Оценка КСЯ моря рассчитывалась по формуле

$$R(\lambda) = (B_{sea}(\lambda) - rB_{sky}(\lambda))/B_o(\lambda), \quad (4)$$

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_o – яркость белого отражателя.

По сравнению с измерениями подповерхностным спектрометром наш метод измерения КСЯ, конечно, имеет несколько большую погрешность, так как измеряются не две, а три величины, однако практическая реализация его гораздо проще (не требует остановки судна или специальных приспособлений для буксировки прибора). Погрешность измерения величины в (4) вычисляется по соотношению сигнал/шум прибора и с помощью обычных соотношений для погрешности суммы и частного от деления двух величин: она равна приблизительно 1% в диапазоне 400–600 нм и возрастает при измерении малых величин в диапазоне 600–700 нм. Оценку погрешности измерения можно провести непосредственно по полученным спектрам, считая отклонения от средней линии на небольших участках спектра (~30 нм) результатом погрешности измерений. Видно (рис. 3в), 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 наибольшую дополнительную погрешность вносит несинхронность измерений всех трех величин, входящих в выражение для КСЯ (при измерении яркости моря, неба и белого отражателя), особенно на ходу судна в условиях переменной облачности, сильном волнении и нестабильных оптических характеристиках исследуемой водной массы. 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 нами оригинальный метод калибровки позволяет, как будет показано ниже, даже при плохих погодных условиях

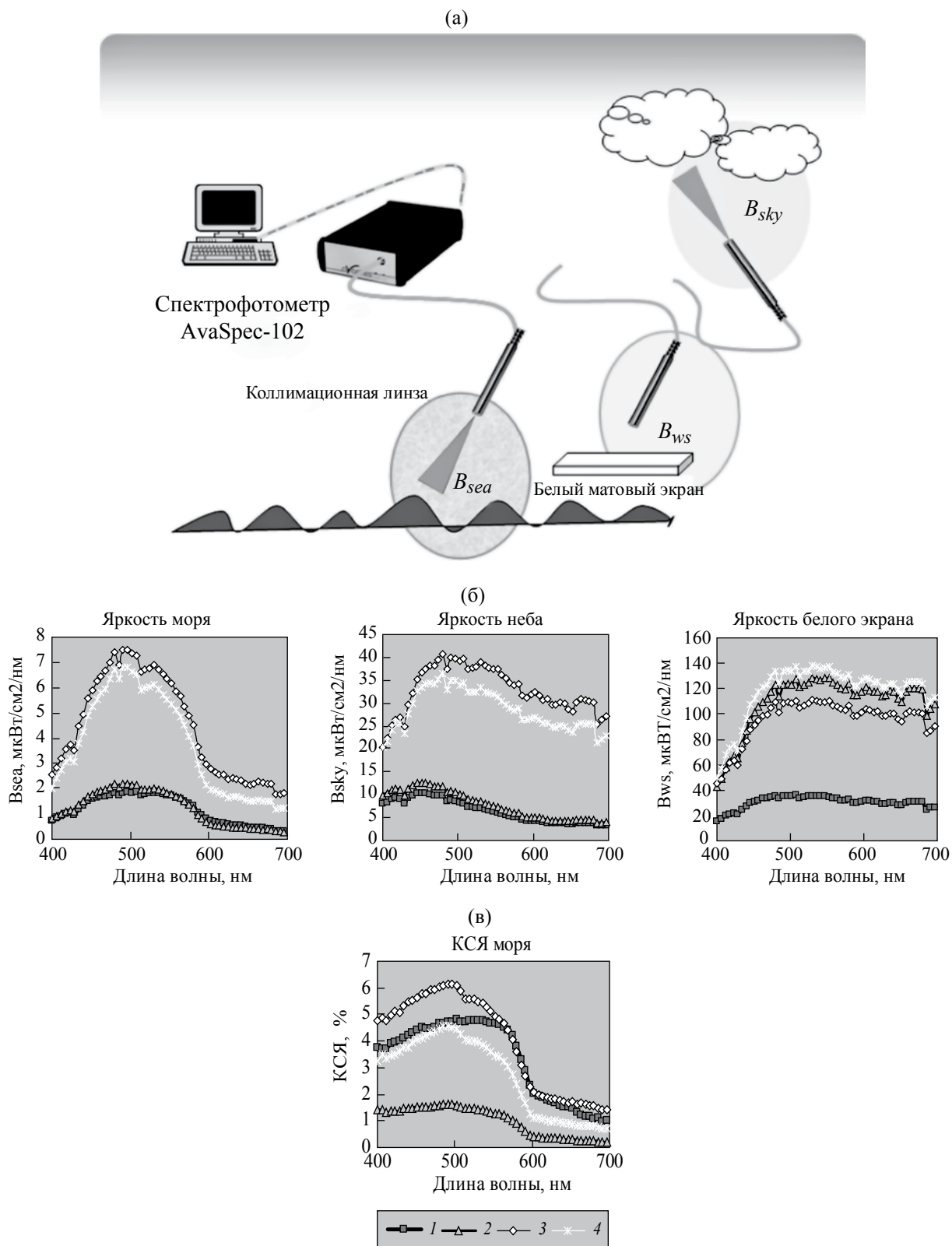


Рис. 3. Схема измерений гиперспектральным спектрофотометром для получения спектров КСЯ моря (а). Измеренные в диапазоне 400–700 нм спектры яркости излучения, восходящего от морской поверхности, спектры яркости участка неба, дающего основной вклад в отражение света от поверхности воды при измерении яркости моря, и яркость горизонтально расположенного белого матового экрана (б). Спектры КСЯ, рассчитанные по этим данным (в). Кривые 1–4 получены при удалении судна от берега.

и неполной синхронизации отдельных измерений получать удовлетворительные спектры, по которым можно оценивать концентрации примесей для сравнения с измерениями на пробах воды.

Динамический диапазон измеряемых величин хорошо прослеживается на рис. 3б. Здесь показаны спектры яркости, полученные на полигоне в четырех точках по мере удаления судна от берега. Видно, что при сохранении общего характера спектра яркость измеряемых объектов сильно меняется из-за наличия облачности и сильного ветра, который изменяет условия облученности при переходе от одного объекта к другому (так, первые пять измерений в позициях 1 и 2 были сделаны при экранировании прямого солнечного света облаками, а последнее измерение яркости экрана совпало с выходом солнца из-за облаков, что и обеспечило увеличение яркости). Таким образом, видно, что динамический диапазон достаточно велик как при переходе от измерения одной величины к измерению другой, так и при съемке спектра одной и той же величины при разных характеристиках облачности. В результате получают спектры КСЯ (рис. 3в), требующие дальнейшей калибровки.

4. КАЛИБРОВКА СПЕКТРОВ КОЭФФИЦИЕНТА ЯРКОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА ЧИСТОЙ МОРСКОЙ ВОДОЙ

При рассмотрении КСЯ моря можно заметить наличие определенного изгиба в диапазоне 580–630 нм. Поглощение и светорассеяние естественных морских примесей (хлорофилла, “желтого вещества” и взвеси) не имеют никаких особенностей в этом спектральном диапазоне. В то же время поглощение чистой морской водой здесь превосходит поглощение света примесями и возрастает с увеличением длины волны, причем как раз при 600 нм его рост скачком замедляется (рис. 4) [13, 35, 37, 38]. Для проведения калибровки спектров выберем диапазон 580–700 нм (красную область) и будем считать, что в этом диапазоне коэффициент обратного рассеяния не меняется (предложенный метод калибровки может быть адаптирован к различным видам спектра показателя обратного рассеяния на взвеси, однако, за неимением конкретных данных, какой же спектр брать, за основу был принят неселективный спектр). Кроме того, на первом шаге калибровки значения коэффициентов поглощения пигментами фитопланктона и “желтым веществом” считаем малыми по сравнению с коэффициентом поглощения чистой водой и взвесью:

$$b_b \approx b_{w600} + b_{sm} = b_{600} = \text{const} \\ a_p, a_{ys} \ll a_w + a_{sm} \text{ при } 580 < \lambda < 700 \text{ нм.} \quad (5)$$

Тогда разница в поглощении в этом диапазоне будет обеспечиваться только поглощением чистой морской водой, то есть известна заранее:

$$a_{700} = a_{600} + \Delta_1, \quad \text{где } \Delta_1 = a_{w700} - a_{w600}, \\ a_{580} = a_{600} - \Delta_2, \quad \Delta_2 = a_{w600} - a_{w580}. \quad (6)$$

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 ΔR – неизвестные величины. Предположения о неселективности величин k и ΔR в (7) сделаны при анализе возможных причин возникновения этих поправок. Так, коэффициент k , отличный от 1, возникает при изменении скачком общей освещенности между измерениями, при этом относительное спектральное распределение не меняется (см. рис. 3б), следовательно, k неселективен. Величина ΔR , отличная от 0, возникает из-за волнения при измерении яркости участка неба, соседнего с тем, который дает максимальный вклад в отраженный от поверхности сигнал. Однако его величина также меняется скачком между измерениями, а частное от деления яркости неба на яркость белого отражателя в диапазоне 580–700 нм практически постоянна. Некоторая нелинейность здесь может возникнуть в районе 500 нм и ее можно учесть при вычислении спектров поглощения. Однако при наших измерениях величина ΔR оказалась мала, и в первом приближении было принято решение считать ее постоянной. В дальнейшем при необходимости можно ввести эту поправку. Подставляя в левую часть (7) выражение (2) для КСЯ, получаем:

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

Учитывая соотношения (5) и (6) для красной области спектра, можно записать систему уравнений для трех измеренных значений КСЯ на 580, 600 и 700 нм:

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

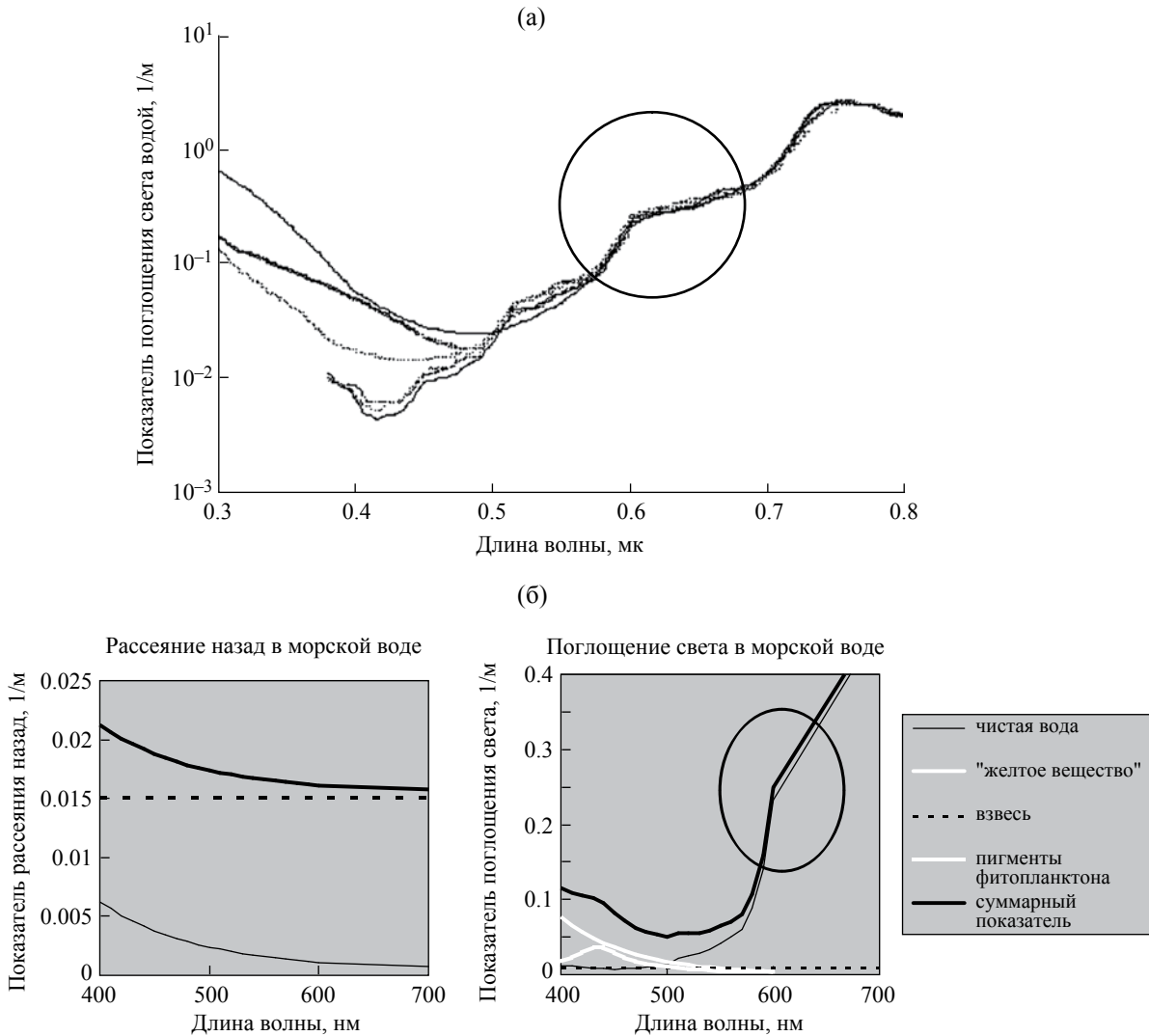


Рис. 4. Спектр поглощения чистой морской водой по данным многочисленных измерений (приведено согласно [38]): в районе 600 нм происходит скачкообразное изменение зависимости поглощения от длины волны (а). Спектры поглощения и рассеяния назад водой и основными естественными примесями в морской воде – на 600 нм особенность имеет только поглощение водой (б).

Это система трех уравнений с тремя неизвестными: $a_{600} + b_{600}$, $\frac{k}{k_0 \cdot b_{600}}$ и $\frac{\Delta R}{k_0 \cdot b_{600}}$. Решение

становится неустойчивым при $\Delta_1/\Delta_2 = (R_{600} - R_{700}) / (R_{580} - R_{600})$. Однако левая часть примерно равна 1.6, а правая меньше единицы. Возможно, для каких-то особых эвтрофных вод эта неустойчивость и проявится, тогда при необходимости мы, несомненно, обратим на это внимание и проведем соответствующее исследование. Разрешая систему относительно этих неизвестных и подставляя их в (8), получаем оценку суммарного спектра поглощения и рассеяния назад водой во всем диапазоне измерений (400 ÷ 700 нм):

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

Для олиготрофных вод рассеяние назад определяется в основном рассеянием на флуктуациях плотности морской воды с известной зависимостью от длины волны. Для мезотрофных и эвтрофных вод, которые в основном и встречаются в шельфовых зонах, рассеяние на взвеси существенно превосходит рассеяние на флуктуациях плотности морской воды и определяет величину обратного рассеяния ($b_b/b_{600} \approx 1$). Таким образом, в этих водах мы получаем суммарный спектр поглощения чистой морской водой

и поглощения основными примесями, а также константы, соответствующей рассеянию на взвеси (так как величина обратного рассеяния, как правило, в несколько раз меньше поглощения, на подписях к рисункам для краткости мы говорим об оценках поглощения). Погрешность оценки этого спектра, рассчитанного с применением предложенной калибровки по формуле (10), можно оценить по полученным спектрам (рис. 5в) – относительная погрешность 5–7% (приблизительно столько же получается при оценке по формулам в предположении, что величина поглощения чистой морской водой известна с большей, чем при данных измерениях, точностью). Переходя к абсолютным погрешностям, получаем, что в диапазоне 400–580 нм они порядка 0.005 м^{-1} , в то время как в диапазоне 600–700 нм они достигают 0.02 м^{-1} , так как величина самого поглощения здесь сильно возрастает (отметим, что при вычитании поглощения чистой водой величина абсолютной погрешности не уменьшается, поэтому при оценке концентраций примесей мы диапазон 600–700 нм не используем!) По полученным спектрам можно провести оценку концентрации основных примесей в морской воде.

5. ОЦЕНКА КОНЦЕНТРАЦИИ ОСНОВНЫХ ПРИМЕСЕЙ В МОРСКОЙ ВОДЕ

Оценка концентраций основных естественных примесей в морской воде проводилась по полученным дистанционным спектрам КСЯ на полигоне в районе впадения реки Вулан в Черное море (российское побережье Черного моря).

На рис. 5а показано расположение станций, на которых проводились измерения спектрофотометром с борта судна и отбирались пробы воды. На каждой станции проводилась съемка трех спектров излучения: восходящего от моря излучения, яркости участка неба, дающего наибольший вклад в отраженное от поверхности моря излучение, попадающее в приемник, и освещенность белого горизонтального отражателя. Необходимо подчеркнуть, что остановки судна на станциях были сделаны для забора проб воды и других работ, при этом съемка спектрофотометром могла проводиться и на ходу судна. По измеренным спектрам были рассчитаны спектры КСЯ (рис. 5б). Видно, что при удалении от берега не наблюдается плавного изменения вида этих кривых – это результат воздействия изменяющихся погодных условий. После использования предложенного метода калибровки были получены спектры поглощения морской водой (рис. 5в). Видно, что здесь, в общем и целом,

при удалении от берега поглощение уменьшается. Таким образом, было показано, что при достаточно сильном верхнем ветре, при котором движение облаков изменяло освещенность в течение одного цикла измерений, и при волнении на море 1–2 балла метод калибровки дает хороший результат.

Оценку концентрации основных природных примесей в морской воде проиллюстрируем на примере обработки спектра поглощения на ст. 7 (рис. 6). Вычитая известное поглощение чистой водой, получаем спектр суммарного поглощения примесями. Основными светопоглощающими и светорассеивающими компонентами являются пигменты фитопланктона, имеющие максимум поглощения на 440 нм, растворенная органика 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. Находим коэффициенты для каждой из кривых (например, методом наименьших квадратов), обеспечивающие минимальное отклонение суммарного рассчитанного спектра от спектра, полученного по измерениям спектрофотометра, тем самым определяя наиболее вероятные концентрации этих природных примесей. Например, для случая на рис. 6 были получены следующие величины концентраций природных примесей: поглощение пигментами фитопланктона $a_{p440} = 0.025 \text{ м}^{-1}$, что соответствует их концентрации $C_p = 0.7 \text{ мг/м}^3$ (значения концентрации пигментов по дистанционным измерениям были оценены, используя коэффициент пропорциональности между C_p и величиной поглощения света пигментами фитопланктона на 440 нм, полученный при измерениях на пробах воды), поглощение “желтым веществом” на 500 нм $a_{ys500} = 0.007 \text{ м}^{-1}$ и сумма поглощения и обратного рассеяния взвеси $a_{sm} + b_{600} = 0.035 \text{ м}^{-1}$. Так как концентрации взвеси и “желтого вещества” допустимо оценивать в единицах поглощения (обратных метрах), мы оценили содержания примесей в морской воде. Погрешность оценки концентрации примесей рассчитывалась путем вариации значений каждой из полученных величин концентраций около посчитанных средних. При этом выбиралось то значение, при котором среднеквадратичное отклонение новой модельной кривой от измеренных спектров отличалось от отклонения наилучшей модельной кривой не более, чем на величину погрешности измерений спектров. Проведенные расчеты позволили сделать вывод, что погрешности оценки концентрации фитопланктона и взвеси – порядка 30%, в то время как оценка концентрации “желтого

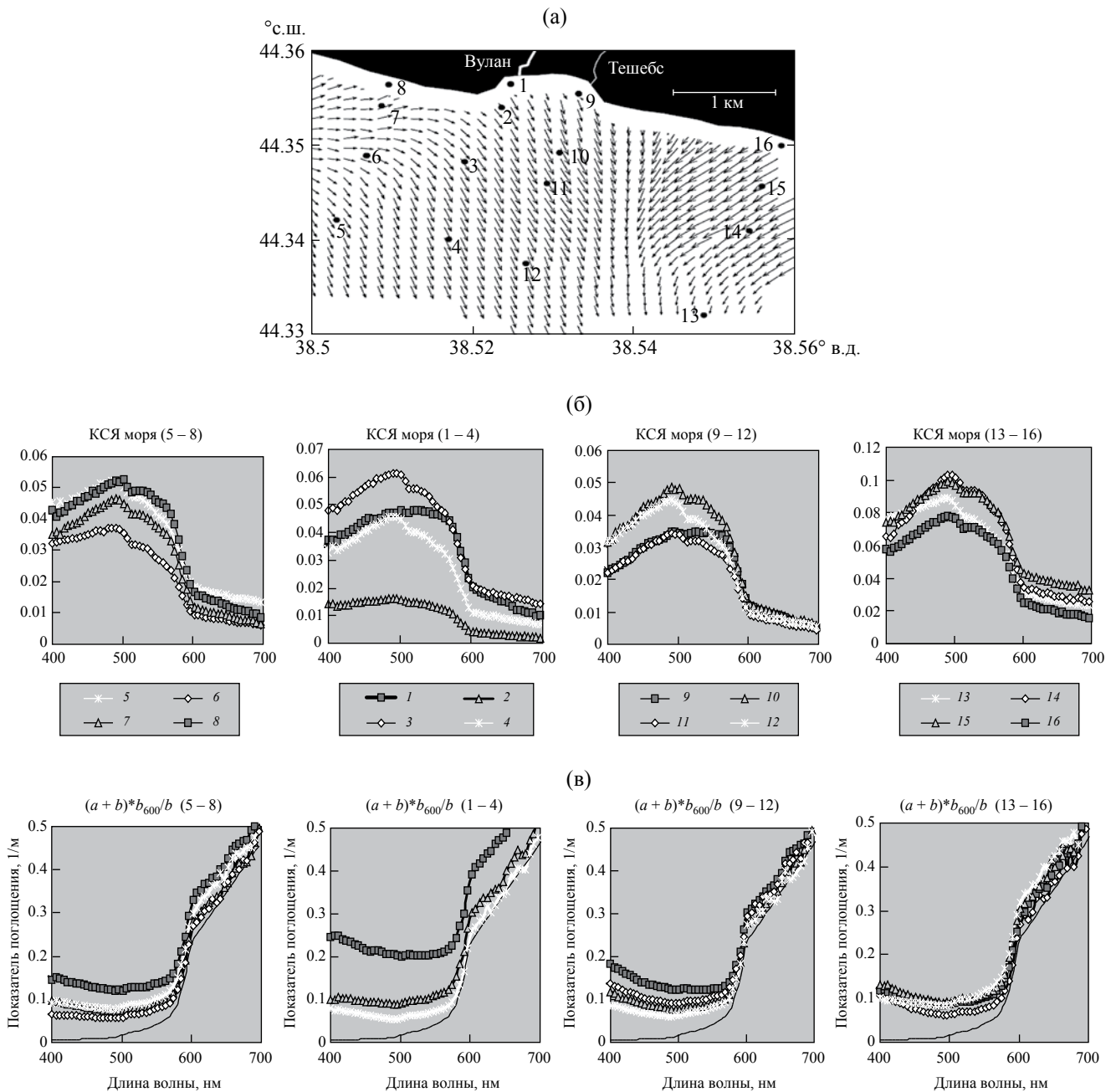


Рис. 5. Измерение КСЯ на полигоне Вулан 7.06.2006 (а) – цифрами обозначены номера станций, на которых проводили измерения спектрофотометром и брали пробы воды (черные кружки), стрелками показаны направления течений по данным ADCP. Полученные спектры КСЯ (б) и спектры поглощения морской водой, рассчитанные с применением предложенной калибровки (в). Более темные линии соответствуют станциям ближе к берегу, тонкая линия – спектр поглощения чистой морской водой.

вещества” – порядка 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 (рис. 7а) 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 сравнивать тенденции изменения концентрации, что и было сделано далее (см. рис. 7б). Важно подчеркнуть, что все оценки получены без предположения о наличии какой-либо корреляции между концентрациями фитопланктона, “желтого

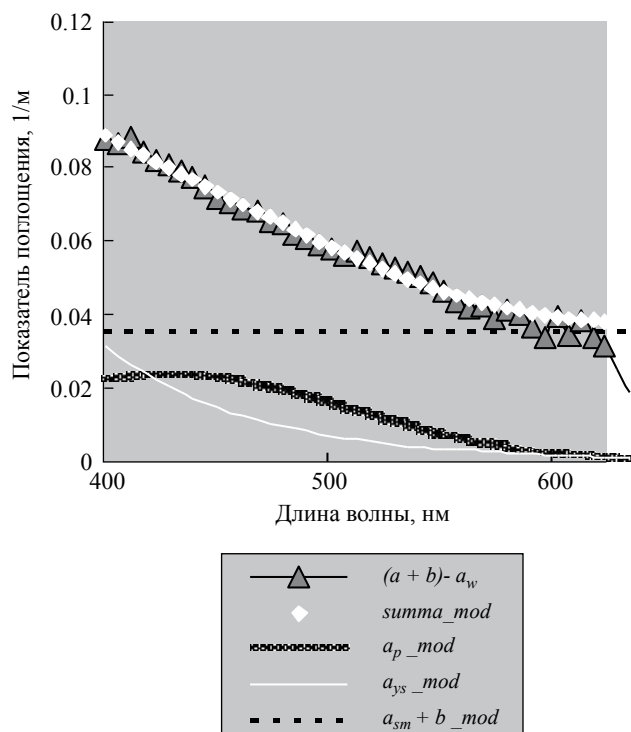


Рис. 6. Оценка концентрации основных природных примесей в морской воде по спектру поглощения (ст. 7). Спектр поглощения примесями, полученный по спектру КСЯ, дан треугольниками. Результаты расчета спектров поглощения света природными примесями (фитопланктоном, “желтым веществом” и взвесью) с наиболее вероятными концентрациями показаны линиями различной толщины и цвета. Их суммарный спектр ($summa_mod$) выделен белыми ромбами. Полученные концентрации: $C_p = 0.7 \text{ мг/м}^3$, $a_{ys500} = 0.007 \text{ м}^{-1}$, $a_{sm} + b = 0.035 \text{ м}^{-1}$.

вещества” и взвеси, что является ключевым моментом при работе в шельфовых водах (водах типа 2).

Используя разработанную методику, были рассчитаны концентрации примесей на всех станциях и проведено сравнение с концентрациями, полученными при обработке взятых проб воды по методикам, описанным в [5, 7, 8, 11, 12]. На рис. 7а темными столбиками даны результаты на пробах, светлыми — оценки по спектрам. Видно, что значения концентраций пигментов фитопланктона, полученные разными методами, хорошо совпадают, кроме станций 1 и 9, расположенных у берега в месте впадения рек. 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,

уменьшаются при удалении от берега. Аналогичные оценки на пробах дают большой разброс значений в связи с тем, что они относятся к приповерхностному слою, однако по порядку величины и общей тенденции они коррелируют 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. На рис. 7б приведена статистика, указывающая на несомненное наличие корреляции оценок концентраций примесей, полученных разными методами. По оси абсцисс отложены значения концентраций, рассчитанные по измеренным спектрам КСЯ. По оси ординат — величины, полученные при измерениях на пробах воды. Приведены соответствующие коэффициенты корреляции. Видно, что корреляция между этими величинами имеется, особенно для взвеси и концентрации пигментов. Концентрация “желтого вещества” в данном районе Черного моря невелика и с трудом поддается измерению как тем, так и другим методом. Однако при всем том, для всех измеряемых величин четко прослеживается тенденция уменьшения при удалении от устья реки (это хорошо видно на рис. 7а, где результаты увязаны с положением станций).

Таким образом, можно сделать вывод о возможности оценки концентраций примесей в водах типа 2 по спектрам, полученным по дистанционным измерениям с борта судна. На рис. 8 по данным, полученным в ходе измерений гиперспектральным спектрофотометром, построены распределения фитопланктона, “желтого вещества” и взвеси в районе исследования. Распределения получены интерполяцией данных на полигоне и экстраполяцией данных не более, чем на четверть расстояния между станциями за пределы полигона. Видно, что в целом концентрации этих природных примесей уменьшаются при удалении от места впадения рек в море. Кроме того, наблюдаются более высокие концентрации в районе восточнее устья рек, что согласуется со схемой распределения скоростей течений, измеренных в том же рейсе (рис. 5а), на которой показано, что с запада идет заток более прозрачной морской воды из удаленных от берега районов моря, и основной поток из устья рек сдвигается к востоку и идет между третьим и четвертым рядами станций — здесь же наблюдаются и более высокие концентрации примесей. Интересно отметить, что при наличии общих черт, все три примеси имеют свои особенности распределения.

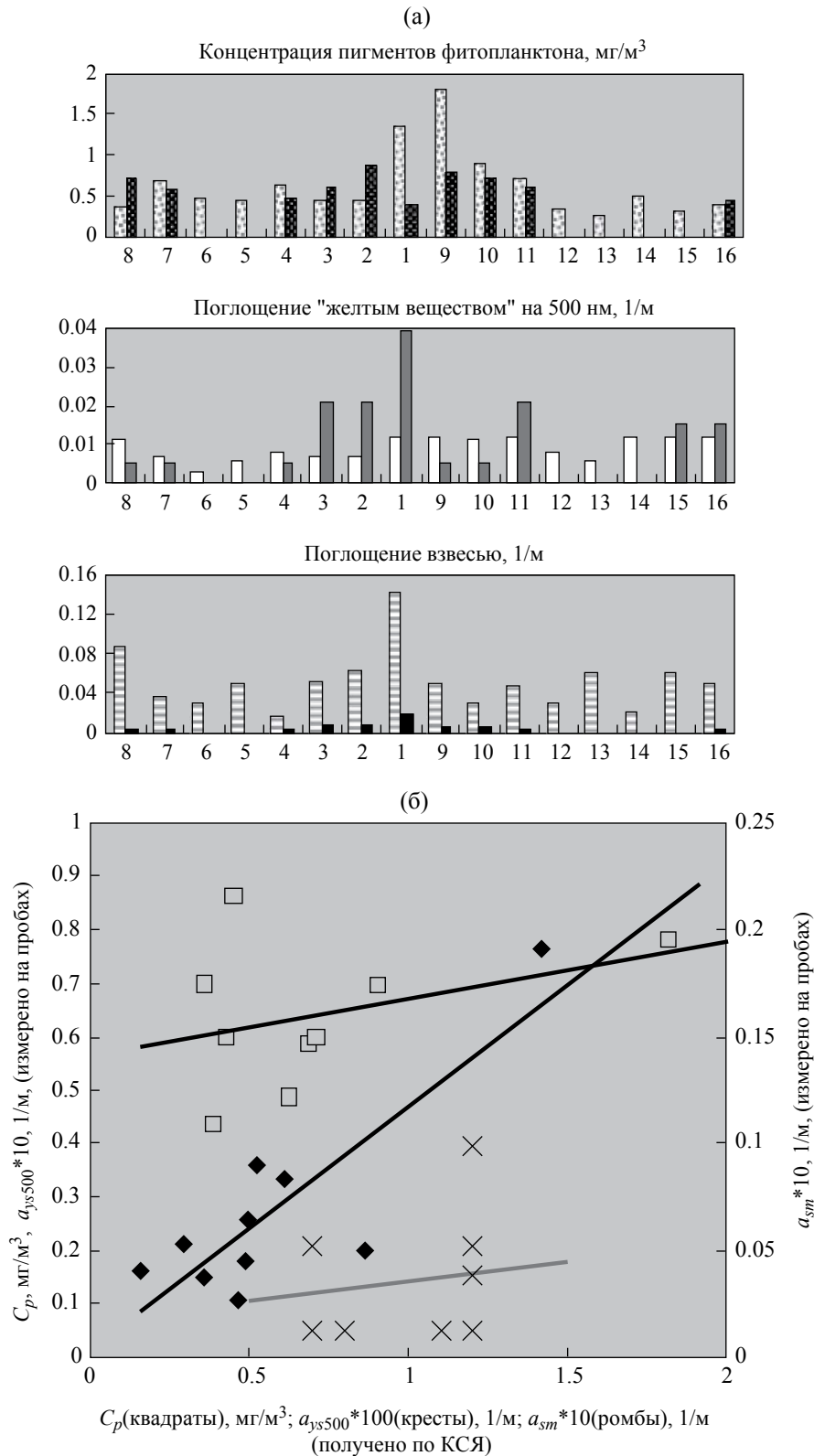


Рис. 7. Сравнение концентраций примесей (пигментов фитопланктона, "желтого вещества" и взвеси), рассчитанных по измеренным спектрам КСЯ (светлые столбики), с результатами обработки взятых проб воды (темные столбики) на всех станциях (а) и статистика (б). Коэффициенты корреляции для концентрации пигментов – $r_{Cp} = 0.36$, для показателя поглощения "желтым веществом" – $r_{ys} = 0.15$, для концентрации минеральной взвеси – $r_{sm} = 0.84$.

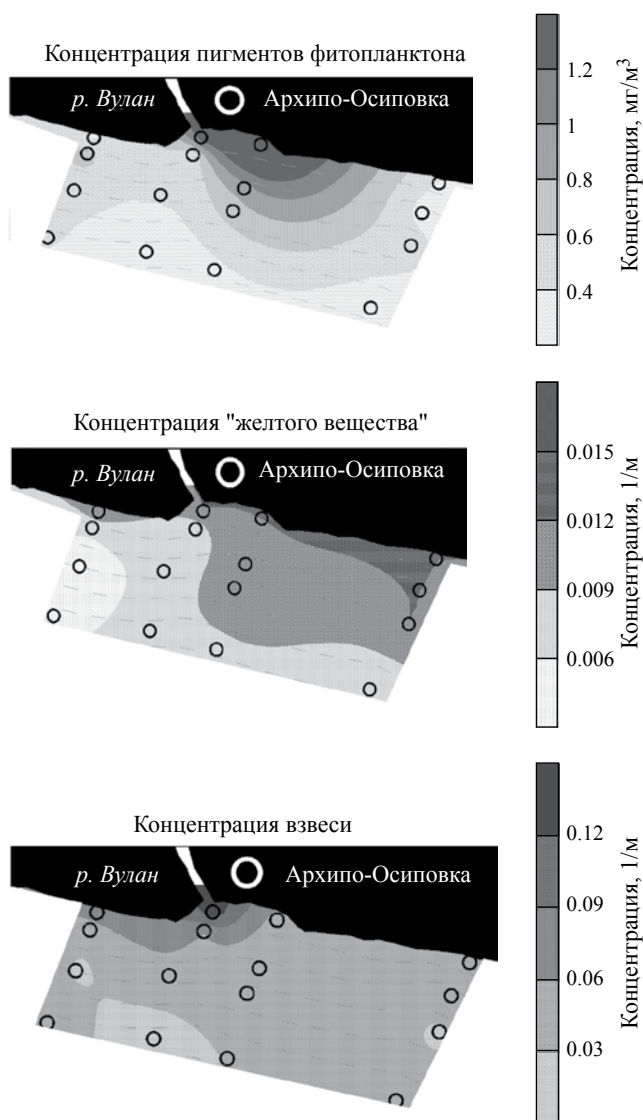


Рис. 8. Распределения фитопланктона, "желтого вещества" и взвеси в районе впадения реки Вулан в Черное море, построенные по данным измерения спектров КСЯ с борта судна.

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ. ВЫВОДЫ

В работе показано, что КСЯ верхнего слоя моря, получаемый по измерениям с борта судна, несмотря на погрешности дистанционной оценки спектров, является очень информативной характеристикой состава морской воды. Для его измерения использован спектрофотометр, имеющий малые габариты и вес 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.

Получаемые спектры КСЯ природных вод имеют, как известно, свои особенности в водах

различных типов. В открытом океане (воды типа 1 по Морелю) светопоглощение и светорассеивание водами зависит от концентрации фитопланктона и, следовательно, спектры КСЯ могут быть описаны однопараметрической моделью, где в качестве параметра может использоваться как концентрация фитопланктона, так и какой-либо оптический параметр, например, вертикальное ослабление света на длине волны 500 нм. В результате получается семейство кривых, охватывающих весь диапазон возможных типов вод от олиготрофных до мезотрофных и эвтрофных вод. При этом спектры КСЯ вод, имеющих одинаковые концентрации фитопланктона, одинаковы: это видно по результатам измерений в антарктических водах, водах центральной Атлантики, водах Бенгельского и Канарского апвеллингов.

В прибрежных и шельфовых водах (водах типа 2) соотношение между концентрациями трех основных природных примесей нарушается. Здесь все воды одной трофности можно разделить на четыре основных типа (трофность воды Т принимает значения О, М или Е в зависимости от своего уровня): воды с преобладанием "желтого вещества" (Т + Y), воды с преобладанием серой взвеси (Т + S), а также смешанный тип (Т + Y + S); кроме того от типа взвеси может зависеть яркость рассеянного излучения (Т + Y + S'). Показано, что все они имеют характерную форму спектров КСЯ — это дает возможность по полученному спектру говорить о преобладании той или иной примеси в составе воды. Все эти типы спектров наблюдались в морях, омывающих Европу.

Наконец, предложен способ калибровки спектров КСЯ, получаемых в сложных метеорологических условиях (при облачности и ветре). Это существенно расширяет возможности использования предложенного метода измерения КСЯ с борта судна. Калибровка основана на использовании свойств поглощения света чистой морской водой в диапазоне 580–700 нм. Метод удобен тем, что в этом диапазоне поглощение света всеми основными примесями не имеет особенностей и, как правило, мало. В результате калибровки получаются спектры поглощения света морской водой. Используя эти спектры и известные спектры удельного поглощения света тремя основными примесями, можно рассчитать концентрации примесей.

Проведение измерений в зоне впадения рек у побережья Черного моря позволило проверить предложенные методики измерения КСЯ гиперспектральным спектрофотометром, калибровки полученных 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. В дальнейшем будут проведены работы по совершенствованию измерения КСЯ с борта судна, методики расчета интересующих нас величин, а также проведено сравнение с измерениями на большем количестве проб для уточнения статистических показателей в различных водах.

Так как съемка может проводиться с борта движущегося судна, предложенный метод удобно применять в случае необходимости картирования распределения примесей в прибрежных районах морей.

Работа выполнялась по гранту РНФ № 14-17-00382 (“Гидрофизические основы мониторинга и прогноза загрязнений на российском шельфе Черного моря”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Артемьев В.А., Буренков В.И., Возняк С.Б. и др.* Подспутниковые измерения цвета океана: натурный эксперимент в Черном и Эгейском морях // *Океанология*. 2000. Т. 40. № 2. С. 192–198.
2. *Буренков В.И., Ведерников В.И., Ершова С.В. и др.* Использование данных спутникового сканера цвета океана SeaWiFS для оценки биооптических характеристик вод Баренцева моря // *Океанология*. 2001. Т. 41. № 4. С. 485–492.
3. *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.
4. *Буренков В.И., Копелевич О.В., Ратькова Т.Н., Шеберстов С.В.* Цветение кокколитофорид в Баренцевом море – спутниковые и судовые наблюдения // *Океанология*. 2011. Т. 51. № 5. С. 1–9.
5. ГОСТ 17.1.04.02–90. Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла “а”. М.: Изд-во стандартов Госкомприроды, 1990. 16 с.
6. *Карабашев Г.С.* Флуоресценция в океане. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 200 с.
7. *Коновалов Б.В.* Определение показателя поглощения света компонентами сестоны по спектру поглощения его осадка на мембранном фильтре // *Океанология*. 1992. Т. 32. Вып. 3. С. 588–593.
8. *Коновалов Б.В., Кравчишина М.Д., Беляев Н.А., Новигатский А.Н.* Определение концентрации минеральной взвеси и взвешенного органического вещества по их спектральному поглощению // *Океанология*. 2014. Т. 54. № 5. С. 704–711.
9. *Коновалов Б.В., Матюшенко В.А., Пелевин В.Н. и др.* Концентрация “желтого вещества” и компонентов сестоны в водах Белого моря и их вклад в светопоглощение // *Опыт системных океанологических исследований в Арктике*. М.: Научный мир, 2001. С. 409–417.
10. *Коновалов Б.В., Матюшенко В.А., Пелевин В.Н. и др.* Растворенное “желтое вещество” и компоненты сестоны в поверхностных водах Баренцева моря в августе 1998 г. // *Опыт системных океанологических исследований в Арктике*. М.: Научный мир, 2001. С. 418–425.
11. *Коновалов Б.В., Пелевин В.Н., Ростовцева В.В. и др.* Поглощение света фитопланктоном в высокоширотных зонах Южного океана // *Арктика и Антарктика*. 2005. Вып. 4(38). С. 80–91.
12. *Коновалов Б.В., Пелевин В.Н., Ростовцева В.В. и др.* Сезонная изменчивость содержания “желтого вещества” и компонентов сестоны в некоторых районах атлантического сектора Южного океана // *Арктика и Антарктика*. 2005. Вып. 4(38). С. 92–102.
13. *Копелевич О.В.* Оптические свойства чистой воды в спектральной области 250–600 нм // *Оптика и спектроскопия*. 1976. Т. 41. Вып. 4. С. 666–668.
14. *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.
15. *Копелевич О.В., Шеберстов С.В.* Оценка по спутниковым данным межгодовых и сезонных изменений температуры поверхности Атлантического океана и концентрации хлорофилла в поверхностном слое в период 1998–2008 гг. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. Т. 7. № 1. ИКИ РАН. М.: ООО “ДоМира”, 2010. С. 238–247.
16. *Копрова Л.И., Коновалов Б.В., Пелевин В.В. и др.* Изменчивость комплекса оптических и гидрологических параметров поверхностных вод Атлантического океана // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана*. 2010. Т. 46. № 2. С. 212–227.
17. *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. № 5. С. 664–669.
18. *Оптика океана*. Т. 1 / Под ред. Моница А.С. М.: Наука, 1983. 372 с.
19. *Пелевин В.Н.* Оптические явления на поверхности океана // *Явления на поверхности океана* / Под ред. Моница А.С. и Красицкого В.П. Л.: Гидрометеиздат, 1985. С. 318–329.
20. *Пелевин В.Н., Ростовцева В.В.* Определение концентрации примесей в морской воде по спектру восходящего солнечного излучения // *Оптика атмосферы и океана*. 1996. Т. 9. № 12. С. 1653–1658.

21. *Пелевин В.Н., Ростовцева В.В., Попов И.К.* О спектральной яркости моря вблизи Антарктиды и возможности дистанционного определения концентрации хлорофилла и “желтого вещества” // *Материалы IV международной научно-технической конференции “Современные методы и средства океанологических исследований” (МСОИ-2000)*. 2000. Ч. 1. С. 243–254.
22. *Babin M., Morel A., Fournier-Sicre V. et al.* Light scattering properties of marine particles in coastal and open ocean waters as related to the particle mass concentration // *Limnol. Oceanogr.* 2003. V. 48. № 2. P. 843–859.
23. *Babin M., Stramski D., Ferrari G.M. et al.* Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles and dissolved organic matter in coastal waters around Europe // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. № C7: 3211, doi:10.1029/2001JC000882.
24. *Baker K.S., Smith R.C.* Bio-optical classification and model of natural waters 2 // *Limnol. Oceanogr.* 1982. V. 27. № 3. P. 500–509.
25. *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 Sensing.* 2003. № 24. P. 3791–3806.
26. *Bowers D.G., Binding C.E.* The optical properties of marine suspended particles: A review and synthesis // *Estuarine, Coastal and Shelf Sci.* 2006. V. 67. P. 219–230.
27. *Bricaud A., Morel A., Babin M. et al.* Variations of light absorption by suspended particles with chlorophyll a concentration in oceanic (case 1) waters: Analysis and implications for bio-optical models // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. № C13. P. 31033–31044.
28. *Darecki M., Weeks A., Sagan S. et al.* Optical characteristics of two contrasting Case 2 waters and their influence on remote sensing algorithms. // *Cont. Shelf Res.* 2003. V. 23. № 3–4. P. 237–250.
29. *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 // *Procs. of VII Intern. Conf. “Current Problems in Optics of Natural Waters (OWN’2013)”*. St.-Peterburg: Nauka, 2013. P. 67–71.
30. *Morel A.* Optical modelling of the upper ocean in relation to its biogenous matter content (case 1 waters) // *J. Geophys. Res.* 1988. V. 93. № C9. P. 10749–10768.
31. *Morel A., Prieur L.* Analysis of variations in ocean color // *Limnol. Oceanogr.* 1977. V. 22. № 4. P. 709–722.
32. *Palmer S.C.J., Pelevin V.V., Goncharenko I.V. et al.* Ultraviolet fluorescence LiDAR (UFL) as a measurement tool for water quality parameters in turbid lake conditions // *Remote Sens.* 2013, V. 5. № 9. P. 4405–4422; doi:10.3390/rs5094405.
33. *Pelevin V.N., Rostovtseva V.V.* Estimation of “yellow substance” concentration in sea water by various contact and remote measurements data // *Proceedings of SPIE.* 2000. V. 4341. P. 459–465.
34. *Pelevin V.N., Rostovtseva V.V.* Modeling of bio-optical parameters of open ocean waters // *Oceanology.* 2001. V. 43. № 4. P. 469–477.
35. *Pope R.M., Fry E.S.* Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. Integrating cavity measurements // *Appl. Opt.* 1997. V. 36. P. 8710–8723.
36. *Prieur L., Sathidranath 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. № 4. P. 671–689.
37. *Tyler J.E., Smith R.C., Wilson W.H.* Predicted optical properties for clear natural water // *J. Opt. Soc. Amer.* 1972. V. 62. № 1. P. 83–91.
38. *Wozniak B., Dera J.* Light Absorption in Sea Water // New York: Springer Science+Business Media, LLC. 2007. 454 p.
39. *Wozniak B., Ostrowska M.* Composition and resources of photosynthetic pigments of the sea phytoplankton // *Oceanology.* 1990. V. 29. P. 91–115.
40. *Wozniak B., Ostrowska M.* Optical absorption properties of phytoplankton in various seas // *Oceanology.* 1990. V. 29. P. 117–146.

Method of Estimation of Admixtures Content in Seawaters Using Operative Spectrophotometry

V. V. Rostovtseva, B. V. Konovalov, I. V. Goncharenko, D. V. Khlebnikov

Spectra of the radiance coefficient of seawater surface measured in open ocean as well as in coastal waters are discussed and different kinds of these spectra are revealed corresponding to the water types. The method of the sea radiance coefficient spectrum measurement from board a moving ship with the help of the hyperspectral spectrophotometer is thoroughly described. Some results of the investigation of an aquatory of the Russian Black Sea Coast at river mouths are given. A new method of calibration was suggested and proved that gives the possibility to process some measurements taking into account the impact of cloudiness and wind. After the obtained spectra were improved the concentrations of the main natural seawater admixtures were estimated and compared to the direct measurements on water samples. It is shown that the discussed method of remote measurement of sea radiance coefficient spectra from board a ship gives the possibility to obtain operative maps of spatial distribution of the main seawater admixtures.