

Восстановление биооптических характеристик вод Черного моря при условии постоянства коэффициента яркости на длине волны 400 нм

Рассматривается метод решения обратной задачи биооптики моря на основе спектра восходящего излучения. Предложена методика коррекции данных измерений путем фиксации величины коэффициента яркости на длине волны 400 нм. Исследуется влияние этого предположения на восстановление концентраций примесей морской воды. Рассчитанные значения концентрации хлорофилла соответствуют данным прямых биологических измерений, а восстановленные спектры показателя поглощения фитопланктона имеют локальные максимумы, характерные для биологических частиц. Применяемая коррекция позволяет уменьшить влияние погрешностей измерения на результаты восстановления и повысить устойчивость решения обратной задачи.

Введение

Для проведения глобальных исследований биооптических свойств поверхностных вод наиболее удобной гидрооптической характеристикой является коэффициент яркости моря. Спектр восходящего излучения зависит от взвешенных и растворенных в воде органических веществ, при этом количество неизвестных характеристик среды существенно превышает количество измеряемых параметров. Оценка характеристик водных масс по данным коэффициента яркости представляет собой классическую обратную задачу.

Анализ данных спутниковых сканеров цвета моря предполагает учет состояния атмосферы по одному или двум спектральным каналам, лежащим в инфракрасной части спектра. При этом точность атмосферной коррекции зависит от точности спутниковой или априорной информации о спектрально-угловых свойствах рассеяния света на аэрозольных частицах, необходимой для экстраполяции величины атмосферной дымки из инфракрасной в видимую область спектра. Такая экстраполяция может приводить к большим ошибкам в оценке атмосферной дымки и соответственно – к значительным ошибкам в последующем определении коэффициента яркости в коротковолновой области видимого диапазона. Наличие информации об особенностях отражения света морем в синей области позволило бы значительно повысить точность атмосферной коррекции, например, как это было сделано в [1].

В данной работе на основании анализа спектров коэффициента диффузного отражения предлагается наложить ограничения на величину коэффициента яркости в синей области спектра. Цель работы – проверить, как это скажется на результатах решения обратной задачи для данных, полученных с поверхности. Обратная задача биооптики решается аналитическим методом. Такой подход имеет большую информативность, поскольку позволяет восстанавливать не только концентрации оптически активных примесей морской воды, но и особенности их спектров поглощения в естественных условиях, а также величину обратного рассеяния взвеси для зеленой области спектра.

Аппаратура и методика измерений

Экспериментальные данные получены в рамках проекта Космического агентства Франции «Долговременные атмосферные биооптические и гидрологические наблюдения в Черном море для валидации сканера *MERIS* и проекта НАН Украины «Спутниковая океанография». Исследования проводились на океанографической платформе в Кацивели (44°23' с.ш., 33°59' в.д.) в 2002 – 2004 гг. В данном исследовании используются результаты измерений спектров коэффициентов яркости и диффузного отражения, а также данные прямых биологических измерений концентраций пигментов [2] для оценки точности работы алгоритма.

В эксперименте на океанографической платформе измерения коэффициента яркости моря проводились с помощью разработанного в лаборатории отдела оптики моря МГИ НАН Украины универсального спектрофотометра [3]. В нем предусмотрена возможность измерения углового распределения спектральной яркости восходящего излучения или яркости небосвода, нормированных на спектральную облученность поверхности моря. Калибровка прибора проводилась с помощью белого диффузно отражающего экрана с известным коэффициентом яркости. Были измерены спектры коэффициента яркости в интервале длин волн 390 – 720 нм с шагом 5 нм.

После измерения с платформы общего коэффициента яркости моря ρ_{sea} в поле зрения объектива спектрофотометра устанавливалась заполненная водой кювета с поглощающими стенками и дном для получения в условиях той же освещенности характеристик отражения только водной поверхности. Спектры коэффициента яркости водной поверхности ρ_{surf} в последующем вычитались из спектров общего коэффициента яркости моря, и таким образом определялся коэффициент яркости воды ρ_w [3]:

$$\rho_w = \rho_{sea} - \rho_{surf} \quad (1)$$

При помощи спектрофотометра фирмы «*Satlantic, Inc.*» измерялось восходящее и нисходящее излучение на длинах волн 412, 443, 490, 510, 560, 620, 665 нм. Выходящее из моря излучение измерялось непосредственно под поверхностью. В расчетах использовался коэффициент диффузного отражения (КДО)

$$R = \frac{E_u(-0)}{E_d(+0)},$$

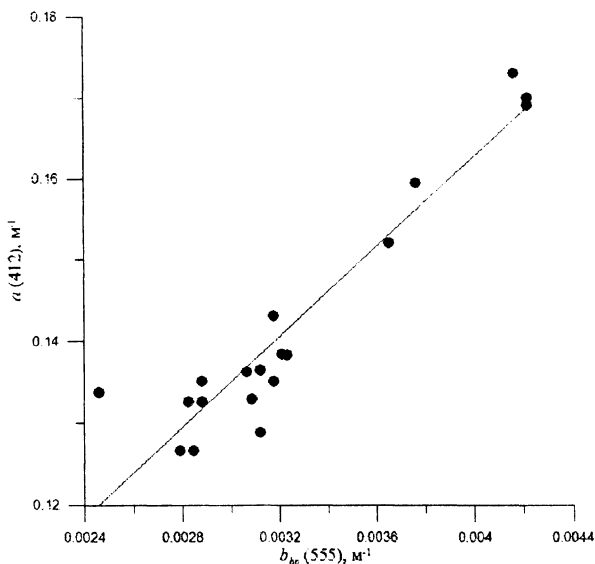
где $E_d(+0)$ – нисходящая облученность над поверхностью, $E_u(-0)$ – восходящая облученность под поверхностью.

Коррекция данных

В простейшем случае КДО линейно зависит от отношения показателя рассеяния назад к поглощению, поскольку можно пренебречь рассеянием по сравнению с поглощением:

$$R = k \frac{b_b}{a}$$

Анализ экспериментальных измерений индикатрис рассеяния и поглощения примесей морской воды в прибрежной зоне Черного моря показывает, что величина показателя обратного рассеяния линейно связана с поглощением, наиболее сильно – в синей области (рис. 1) [4]. Следовательно, отношение этих величин можно считать практически постоянным. Тогда для случая, когда можно пренебречь поглощением и рассеянием чистой воды в синей области спектра, величина КДО должна мало меняться от измерения к измерению.



Р и с. 1. Корреляция между обратным рассеянием на частицах (длина волны 555 нм) и поглощением примесей (длина волны 412 нм). Уравнение регрессии $a = 27,74b_{bp} + 0,52$; $R^2 = 0,89$

Отметим, что разброс экспериментальных значений R в синей области изначально был невелик (рис. 2), что также свидетельствует о правильности такого предположения. При изменении концентрации пигментов в 3 раза значение КДО на длине волны 412 нм меняется на 11%.

Величина КДО в красной области спектра принимается малой по аналогии с его нулевым значением в стандартных алгоритмах атмосферной коррекции. Таким образом, в качестве постоянных значений на краях видимой области можно принять средние значения по всем полученным данным. В нашем эксперименте $R^*(412) = c_1 = 1,78\%$, $R^*(665) = c_2 = 0,033\%$. Исходя из этих предположений, предложено использовать в расчетах скорректированные значения КДО:

$$R^*(\lambda) = R(\lambda) + C(\lambda), \quad (2)$$

где

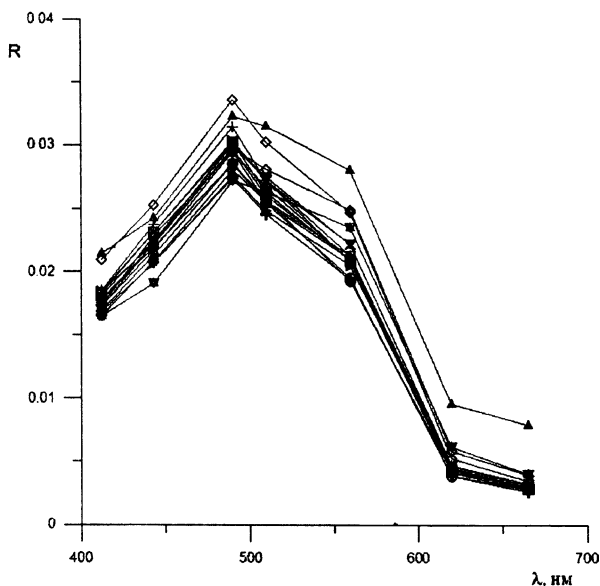
$$C(\lambda) = \frac{a(c_1, c_2)}{\lambda} + b(c_1, c_2). \quad (3)$$

Коэффициенты a и b вычисляются для каждого полученного спектра по формулам

$$a = \frac{\Delta_{665} - \Delta_{412}}{\frac{1}{665} - \frac{1}{412}}, \quad b = \Delta_{665} - \frac{a}{665}, \quad (4)$$

где

$$\Delta_{412} = C(412) = R^*(412) - R(412), \quad \Delta_{665} = C(665) = R^*(665) - R(665).$$



Р и с. 2. Экспериментальные данные КДО [5]

Расчеты показали, что значения концентраций примесей, восстановленные по скорректированным данным КДО, мало отличаются от полученных без введения поправки. Значения коэффициентов корреляции восстановленных концентраций с данными биологических измерений при применении коррекции выше, чем без нее. Это свидетельствует в пользу того, что реальный разброс значений КДО в синей области невелик и они могут считаться постоянными без потери заключенной в спектре информации о биологическом состоянии водных масс. Кроме того, приведенное преобразование исходных данных позволяет частично нейтрализовать влияние погрешности измерений.

В настоящей работе исследуется влияние коррекции спектров коэффициента яркости на возможность восстановления концентраций примесей. В простейшем случае поправка на различие шероховатости поверхности воды в кювете и в море может представлять собой одно дополнительное постоянное слагаемое в формуле (1). В данном случае предлагается считать, что поправка $C(\lambda)$ имеет спектральный ход, соответствующий спектральному поведению света неба. Коэффициенты a и b вычисляются по формулам, аналогичным (4), но для длин волн 400 и 700 нм при $\rho^*(400) = c_1 = 0,77\%$, $\rho^*(700) = c_2 = 0,03\%$.

Модель

Точность математического описания оптических свойств морской воды мала вследствие наличия большого числа определяющих факторов и их природной изменчивости. Поскольку диапазоны изменчивости широки, детализация модели путем увеличения числа параметров не приведет к улучшению результатов. Для восстановления биооптических свойств содержащихся в морской воде компонентов необходимо выбрать небольшое число параметров, являющихся как информативными, так и достаточно общими. Поэтому в качестве параметров модели выбраны общая концентрация пигментов C_{chl} , поглощение неживой органикой C_{ddm} и рассеяние взвесью $b_{bp}(\lambda_0)$. Кроме того, в морской воде содержится множество микроорганизмов, например бактерии, которые также влияют на коэффициент яркости моря. Поэтому под «концентрацией пигментов» будут подразумеваться пигменты фитопланктона и других микроорганизмов.

Для решения обратной задачи восстановления оптических свойств морской воды используется модель коэффициента яркости моря, подробно описанная в [6]:

$$\rho = k \frac{b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda_0) \frac{\lambda_0}{\lambda}}{a_w(\lambda) + C_{chl} a_{chl}^*(\lambda) + C_{ddm} e^{-\alpha(\lambda-\lambda_0)}}, \quad (5)$$

где $a_w(\lambda)$ – поглощение чистой морской водой [7]; $a_{chl}^*(\lambda)$ – удельное поглощение пигментов, которое также статистически зависит от C_{chl} [8]. Поглощение желтым веществом и детритом описывается одним слагаемым в формуле (5). В работе рассматриваются различные значения спектрального наклона поглощения неживой органики α с учетом характерного соотношения концентраций детрита и растворенной органики в Черном море [2]. Коэффициент k , рассчитанный по индикатрисам рассеяния [3] методом [9], равен 0,15.

Алгоритм

С математической точки зрения вычисление параметров модели по экспериментальным данным сводится к поиску минимума выражения $f = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} [\rho_e(\lambda) - \rho_m(\lambda)]^2$ как функции переменных $b_{bp}(\lambda_0)$, C_{ddm} и C_{chl} на всем спектральном диапазоне, т.е. к решению системы уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial f(b_{bp}, C_{chl}, C_{ddm})}{\partial b_{bp}} = 0, \\ \frac{\partial f(b_{bp}, C_{chl}, C_{ddm})}{\partial C_{chl}} = 0, \\ \frac{\partial f(b_{bp}, C_{chl}, C_{ddm})}{\partial C_{ddm}} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Такая минимизация дает решение математической задачи без учета приближенности модели. Сводя к минимуму отклонения экспериментальных данных от модельных спектров, мы устраняем только случайную погрешность эксперимента, считая модельные представления абсолютно достоверными. Однако модель не описывает и не может описать все возможные особенности поглощения и рассеяния растворенных и взвешенных веществ.

Полосы поглощения желтого вещества и пигментов фитопланктона перекрываются. При этом большим концентрациям хлорофилла соответствуют большие концентрации растворенной органики только статистически. Поэтому не всегда возможно определить, чем обусловлена форма спектра коэффициента яркости: наличием желтого вещества или пигментами фитопланктона.

В разработанном алгоритме эта проблема решается путем выделения участков в видимой области; концентрация каждого вещества определяется на том спектральном участке, где его поглощение проявляется наиболее существенно по сравнению с влиянием других компонентов. Это дает возможность различить спектры поглощения, основываясь на известных общих закономерностях их поведения. Поглощение желтого вещества будет определяться в синей области спектра, пигментов фитопланктона – в области максимума их удельного поглощения. Обратное рассеяние взвесью рассчитывается в диапазоне 460 – 650 нм. Математически это выглядит как разделение системы уравнений (6) следующим образом:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial f(C_{chl}, C_{ddm}, b_{hp})}{\partial b_{hp}} \right|_{\substack{\lambda_2=650 \\ \lambda_1=460}} &= 0, \\ \left. \frac{\partial f(C_{chl}, C_{ddm}, b_{hp})}{\partial C_{chl}} \right|_{\substack{\lambda_2=460 \\ \lambda_1=420}} &= 0, \\ \left. \frac{\partial f(C_{chl}, C_{ddm}, b_{hp})}{\partial C_{ddm}} \right|_{\substack{\lambda_2=395 \\ \lambda_1=390}} &= 0, \end{aligned} \quad (7)$$

причем остальные параметры считаются постоянными в данном участке спектра.

На первом этапе определяется минимум выражения $f = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} [\rho_e(\lambda) - \rho_m(\lambda)]^2$ как функции переменной $b_{hp}(\lambda_0)$ при $\lambda_1 = 460$ нм и $\lambda_2 = 650$ нм, в первом приближении концентрации растворенного органического вещества и пигментов равны нулю. Преобразуя f , как это было сделано в [6], и минимизируя его как функцию C_{chl} , рассчитываем концентрацию пигментов в области 420 – 460 нм на основе полученного значения рассеяния взвесью; аналогично находится и значение концентрации растворенной органики C_{ddm} в области 390 – 395 нм.

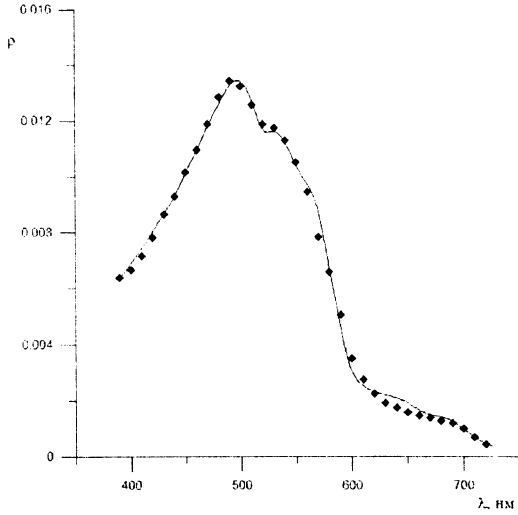
На втором и последующих этапах значения $b_{hp}(\lambda_0)$ определяются с использованием величин C_{chl} и C_{ddm} , рассчитанных на предыдущем шаге. Таким образом, получаем итерационный алгоритм, позволяющий при заданных α и C_{chl0} найти параметры $b_{hp}(\lambda_0)$, C_{ddm} и C_{chl} . Для достижения условия останковки $|C_{chl}^i - C_{chl}^{i-1}| < 0,001$ требуется около 10 итераций.

Поскольку спектр поглощения пигментов содержит информацию о биологическом состоянии фитопланктона, рассчитывались также и спектры его удельного поглощения $a_{ph}^*(\lambda)$ по формуле

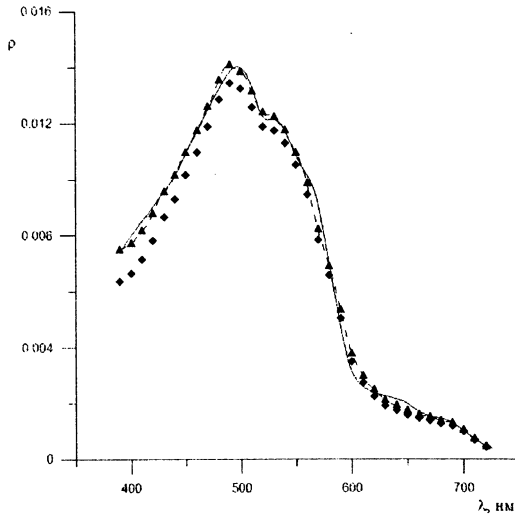
$$a_{ph}^* = \frac{1}{C_{chl}} \left[\frac{kb_h(\lambda)}{\rho_c(\lambda)} - a_w(\lambda) - C_{ddm} e^{-\alpha(\lambda-\lambda_0)} \right]. \quad (8)$$

Результаты

На рис. 3 представлены результаты сравнения измеренных спектров коэффициента яркости с расчетными, при выполнении коррекции и без нее. Модельные спектры хорошо аппроксимируют экспериментальные данные.



a



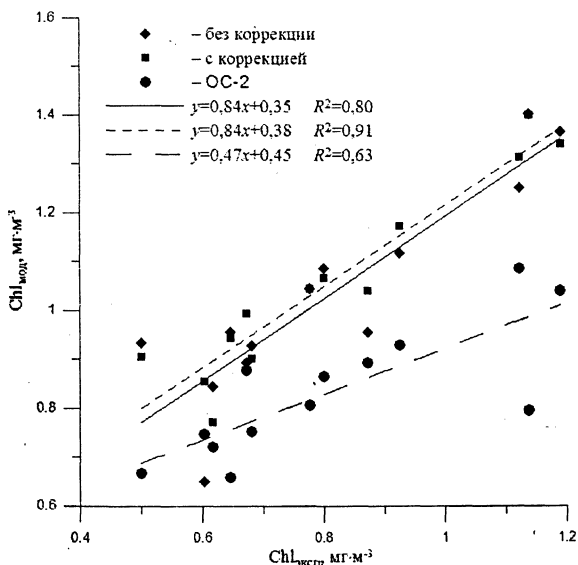
б

Р и с. 3. Сопоставление экспериментальных и модельных спектров коэффициента яркости при отсутствии – *a* и выполнении – *б* коррекции: сплошная линия – расчет, ромбики – эксперимент, треугольники – коррекция

Нужно отметить, что ни величина поверхностной концентрации пигментов, ни среднее по глубине значение не определяют однозначно биологическое состояние морской воды. Восходящее излучение формируется не только в поверхностном, но и в более глубоких слоях. При этом глубинные концентрации пигментов влияют на коэффициент яркости гораздо слабее, чем поверхностные. В некотором приближении можно считать, что каждому измеренному спектру коэффициента яркости соответствует некое эффективное значение концентрации пигментов, которое и восстанавливается в результате моделирования. Его можно определить как концентрацию пигментов в оптически однородном море, имеющем такой же коэффициент яркости, что и оптически стратифицированное море с концентрацией, зависящей от глубины. Для сравнения с модельными результатами эффективные значения концентраций пигментов были рассчитаны на основе биологических профилей хлорофилла как средневзвешенные по глубине концентрации с весом $\frac{\exp(-3\alpha H)}{\sum_i \exp(-3\alpha H_i)}$, где α – показатель ослабления, H – глубина. Полученные

эффективные значения хорошо коррелируют со средними и поверхностными концентрациями.

По сравнению с результатами расчетов по эмпирическим формулам ОС-2 наблюдается лучшая корреляция модельных концентраций пигментов с биологическими данными (рис. 4). Кроме того, численные значения восстановленных концентраций ближе к измеренным биологическими методами. Влияние коррекции на результаты восстановления проявляется таким образом, что модельные значения концентраций численно лучше соответствуют биологическим данным, и разброс данных относительно линии регрессии становится меньше.



Р и с. 4. Сравнение измеренных и рассчитанных различными методами концентраций пигментов

Анализ результатов расчета параметров $b_{sp}(\lambda_0)$ и $C_{d,m}$ показывает, что в прибрежных водах концентрация пигментов слабо связана как с обратным рассеянием, так и с поглощением неживой органикой. Здесь это объясняет плохое соответствие расчетов по эмпирическим формулам биологическим данным.

Используемая оптическая модель морской воды, как и любая модель, не может учесть все происходящие в исследуемой среде процессы. Кроме того, модель основана на лабораторных измерениях поглощения пигментами и желтым веществом [10, 11] и не учитывает эффекты взаимодействия между различными компонентами морской воды, такие, как эффект адсорбции желтого вещества на поверхности клеток [12]. В естественных условиях эффективное поглощение клеток фитопланктона за счет слоя желтого вещества на поверхности будет занижено по сравнению с лабораторными измерениями, когда желтое вещество вымывается из пробы.

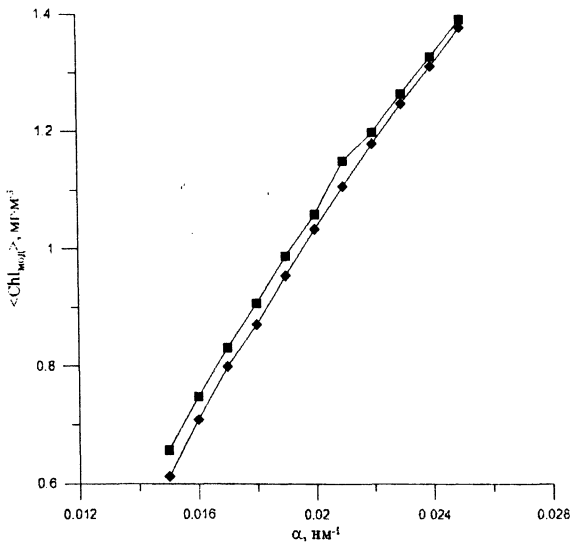
Исследование алгоритма на чувствительность к входным параметрам демонстрирует, как это сказывается на результатах моделирования. На рис. 5 показано влияние входных параметров модели на восстановленные концентрации пигментов. Рост их расчетной концентрации с увеличением параметра спектрального наклона поглощения желтого вещества α и параметра C_{chl0} объясняется особенностями моделей поглощения неживой органики и пигментов, используемых в расчетах.

Коэффициент корреляции измеренных и модельных концентраций пигментов возрастает с увеличением α при отсутствии коррекции данных (рис. 6). Когда входные параметры модели превышают реальные характеристики поглощения желтого вещества, алгоритм приписывает часть его поглощения пигментам, увеличивая их расчетную концентрацию. Это увеличение пропорционально концентрации растворенной органики, которая коррелирует с концентрацией пигментов. Дополнительная корреляция и проявляется в виде роста коэффициента корреляции при увеличении параметра спектрального наклона. Это равносильно тому, что уменьшается влияние параметра $C_{d,m}$ на результаты восстановления. Модель стремится избавиться от одного из параметров, т.к. чем их меньше, тем устойчивее решение.

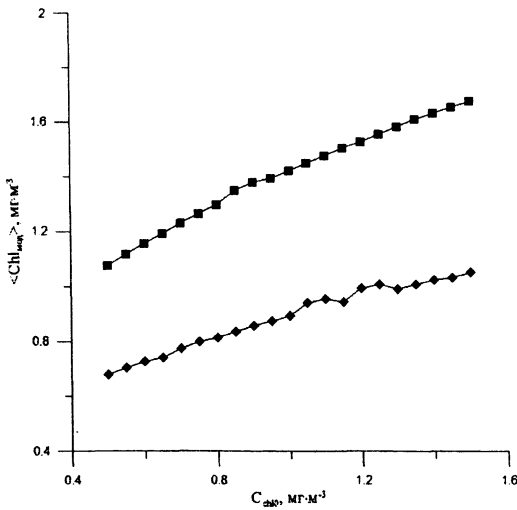
В случае введения поправки коэффициент корреляции измеренных и модельных концентраций пигментов имеет максимум на исследуемом интервале α при некотором его значении, зависящем от остальных входных данных (рис. 6). Это показывает, что предлагаемая коррекция данных нейтрализует влияние погрешностей измерения. Таким образом, модель оказывается достаточно устойчивой и при трех параметрах. Сам коэффициент корреляции изменяется в гораздо меньших пределах, чем при отсутствии коррекции.

Снижение чувствительности к α и уменьшение разброса результатов показывает большую стабильность алгоритма при использовании преобразованных данных. Если коэффициент α не соответствует реальным характеристикам поглощения неживой органики, то относительное изменение концентрации пигментов в исследуемом районе может быть рассчитано более точно и без больших выбросов.

Параметр C_{chl0} практически не влияет на коэффициент корреляции и следовательно, на устойчивость решения. Поэтому соответствие модели реальным биологическим условиям среды зависит в основном от характеристики поглощения желтого вещества.



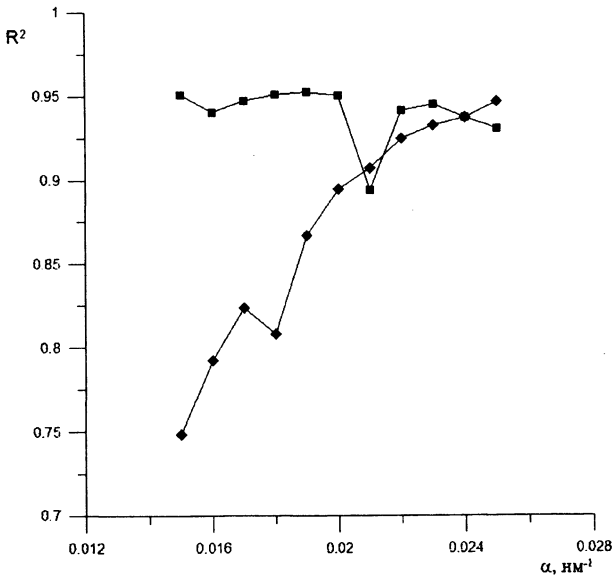
a



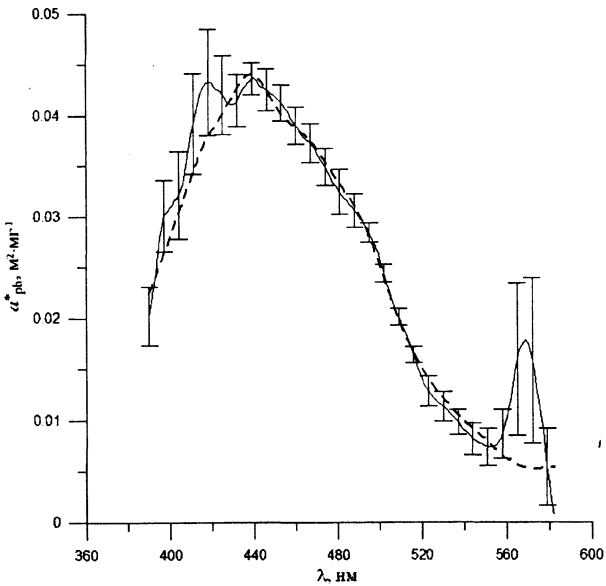
б

Р и с. 5. Зависимость расчетных концентраций от спектрального наклона α – *a* и параметра C_{chl0} – *б*: ромбики – без коррекции, квадраты – с коррекцией

Восстановленные спектры поглощения пигментов фитопланктона имеют форму, характерную для поглощения хлорофилла. Кроме того, на них присутствуют локальные максимумы на длинах волн 570 и 412 нм, что заметно по сравнению с исходным спектром (рис. 7) [8]. Полученные дополнительные максимумы должны быть вызваны некоторыми процессами в море, т.к. излучение неба не имеет локальных особенностей на данных участках спектра. Известно, что полоса поглощения на 570 нм соответствует поглощению цианобактериями, а пик на 412 нм могут давать различные пигменты, например продукты распада хлорофилла [13].



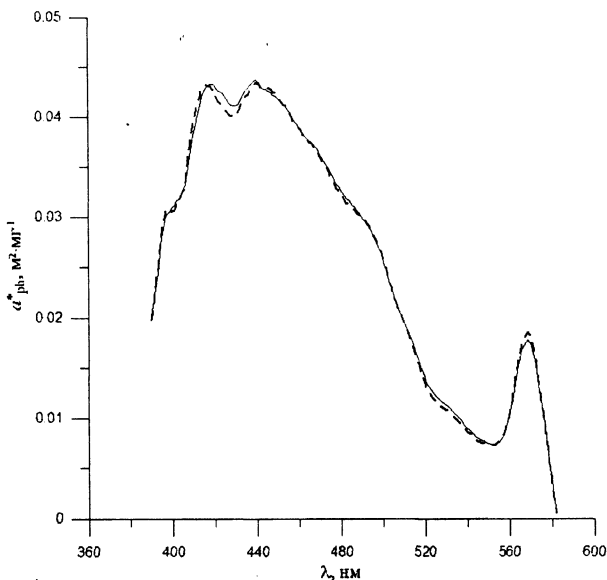
Р и с. 6. Чувствительность модели к параметру спектрального наклона α : ромбики – без коррекции, квадраты – с коррекцией



Р и с. 7. Спектр удельного поглощения пигментов: сплошная линия – расчет, штриховая – модель [8]

Дополнительный максимум на 412 нм в спектре поглощения пигментов не обязательно обусловлен наличием специфических веществ в клетках. Эти вещества могут входить в состав растворенной органики или детрита, но поскольку их поглощение жестко задается моделью, то особенности их спектров были восприняты как побочные пики поглощения пигментов.

Коррекция исходных данных несущественно влияет на форму спектра поглощения, сглаживая дополнительные пики (рис. 8). Величины доверительных интервалов и их зависимость от длины волны несущественно изменяются при выполнении коррекции.



Р и с. 8. Расчетное поглощение пигментов: сплошная линия – с коррекцией, штриховая – без нее

Выводы

Предлагаемая коррекция экспериментальных данных позволяет повысить устойчивость решения обратной задачи и уменьшить влияние погрешностей измерения на результаты восстановления концентраций примесей морской воды. Проверка подобного преобразования на экспериментальных данных за 3 года исследования показала, что такое улучшение – характерное явление, по крайней мере, для летнего периода. Используемое для коррекции постоянство коэффициента яркости при $\lambda = 400$ нм является дополнительным условием для уточнения спектральных свойств рассеяния атмосферным аэрозолем в коротковолновой области видимого диапазона. Применение аналогичного метода при $\lambda = 412$ нм к спутниковым данным позволит более точно определять вклад моря в измеряемую восходящую яркость системы океан – атмосфера для длин волн $\lambda > 412$ нм.

Получен алгоритм, позволяющий восстанавливать концентрации пигментов фитопланктона. Восстановленные величины концентраций хорошо коррелируют с экспериментальными данными. Алгоритм устойчив к случайным ошибкам и слабо подвержен влиянию погрешностей модели.

Расчитанные спектры поглощения пигментов получены при модельных допущениях и не могут считаться абсолютно достоверными, однако они содержат дополнительную информацию о поглощении морской воды *in situ*, которую затруднительно получить стандартными методами вследствие его малости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Паршиков С.В., Ли М.Е.* Дистанционное зондирование оптически активных примесей в прибрежной зоне моря с использованием коротковолнового участка спектра // Автоматизированные системы контроля состояния морской среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 1992. – С. 65 – 78.
2. *Чурилова Т.Я., Берсенева Г.П.* Поглощение света фитопланктоном, детритом и растворенным органическим веществом в прибрежном районе Черного моря (июль – август 2002 г.) // Морской гидрофизический журнал. – 2004. – №4. – С. 39 – 50.
3. *Ли М.Е., Мартынов О.В.* Измеритель коэффициента яркости для подспутниковых измерений биооптических параметров вод // Экологическая безопасность прибрежных и шельфовых зон и комплексное использование ресурсов шельфа / Под ред. В.А. Иванова. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2000. – С. 163 – 173.
4. *Chami M., Shybanov E.B., Khomenko G.A. et al.* Spectral variation of the volume scattering function measured over the full range of scattering angles in a coastal environment // *Applied Optics*. – 2006. – 45, № 15. – P. 3605 – 3619.
5. *Коротчаев Г.К., Хоменко Г.А., Шами М. и др.* Международный подспутниковый эксперимент на океанографической платформе (пос. Качивели) // Морской гидрофизический журнал. – 2004. – № 3. – С. 28 – 38.
6. *Корчмкина Е.Н., Шибанов Е.Б.* Метод определения спектрального показателя поглощения фитопланктона по коэффициенту яркости моря // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2005. – С. 90 – 94.
7. *Smith R.C., Baker K.S.* Optical properties of clearest natural waters (200 – 800 nm) // *Applied Optics*. – 1981. – 20, № 2. – P. 177 – 184.
8. *Bricaud A., Babin M., Morel A. et al.* Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization // *J. Geophys. Res.* – 1995. – 100, № C7. – P. 13321 – 13332.
9. *Шибанов Е.Б.* Численный метод решения уравнения переноса. Коэффициенты отражения и пропускания оптически тонкого плоскопараллельного слоя // Морской гидрофизический журнал. – 2005. – №3. – С. 62 – 71.
10. *Kishino M., Takahashi N., Okami N., Ichimura S.* Estimation of the spectral absorption coefficients of phytoplankton in the sea // *Bull. Mar. Sci.* – 1985. – 37. – P. 634 – 642.
11. *Mitchell B.G.* Algorithms for determining the absorption coefficient of aquatic particulate using the quantitative filter technique (QFT) // *Ocean Optics X* / Ed. R. Spinrad. – Washington: SPIE Bellingham, 1990. – P. 137 – 148.
12. *Stedmon C. A., Markager S.* Behaviour of the optical properties of coloured dissolved organic matter under conservative mixing // *Estuar. Coast. Shelf Sci.* – 2003. – 57, Iss. 5 – 6. P. 973 – 979.
13. *Phytoplankton pigments in oceanography* // *Monographs on Oceanographic Methodology* Ed. by S. Jeffrey, R. Mantoura, S. Wright. – UNESCO Publishing, 1997. – 661 p.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 02.06.08
После доработки 24.07.08

ABSTRACT Method of solution of the inverse problem of sea bio-optics using the ascending radiation spectrum is considered. Correction of the measurement data by fixation of the reflectance coefficient value on the wavelength 400 nm is proposed. The influence of this assumption on retrieving the seawater impurity concentrations is investigated. The calculated values of chlorophyll concentration correspond to the data of direct biological measurements, and the reconstructed spectra of the phytoplankton absorption index have local maximums characteristic of the living cells. The correction permits to reduce the influence of the measurement errors upon the retrieved results and to increase stability of solution of the inverse problem.