

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ ФИТОПЛАНКТОНА ПО КОЭФФИЦИЕНТУ ЯРКОСТИ МОРЯ

*Е.Н. Корчемкина, Е.Б. Шибанов*

Морской гидрофизический институт НАНУ  
e-mail: [lee@alpha.mhi.iuf.net](mailto:lee@alpha.mhi.iuf.net)

*Используемый метод заключается в решении обратной задачи биооптики моря на основе данных спектра коэффициента яркости моря. Нестандартный способ параметризации оптических свойств морской воды реализован в численном итерационном алгоритме. Рассчитанные значения концентрации хлорофилла соответствуют данным прямых биологических измерений, а восстановленные спектры показателя поглощения фитопланктона имеют локальные максимумы, характерные для биологических частиц.*

Дистанционные оптические методы, основанные на измерениях спектральной яркости восходящего из моря излучения, позволяют судить о содержании и распределении в поверхностных слоях веществ, главным образом биологического происхождения. Это открывает широкие перспективы в применении космических методов для проведения долговременных глобальных исследований морской биосферы, динамики морской экосистемы, биохимических циклов и определения роли океана в глобальном углеродном цикле. Для правильной интерпретации информации со спутниковых сканеров видимого диапазона ее необходимо регулярно сравнивать с данными непосредственных биооптических наблюдений с уровня поверхности океана и с результатами измерений с разных высот из атмосферы. Наиболее удобной гидрооптической характеристикой для такого сравнения является коэффициент яркости моря, который слабо зависит от условий освещения и почти целиком определяется оптическими свойствами морской воды с взвешенными и растворенными в ней веществами. В силу этих причин величина коэффициента яркости моря достаточно устойчива к воздействию случайных помех при изменении гидрометеорологических условий, поэтому его величина может служить индикатором биооптических свойств поверхностных вод. Следовательно, коэффициент яркости моря является одним из главных параметров,

измерение которых должно быть обязательным при проведении подспутниковых экспериментов.

В качестве района исследований выбрана прибрежная часть Черного моря вблизи южной оконечности Крымского полуострова. Черное море подвержено сильному воздействию речного стока и по своим оптическим свойствам соответствует водам второго типа по классификации Мореля. Оптические свойства бассейна испытывают значительную сезонную изменчивость, связанную с цветением фитопланктона и выносом взвеси реками. В море наблюдаются два пика цветения фитопланктона – в конце зимы и осенью.

При дистанционных спутниковых исследованиях состояния океанских вод на больших акваториях широко использовались так называемые эмпирические алгоритмы решения обратной задачи восстановления биооптических характеристик водных масс. Такие алгоритмы включают ряд корреляционных связей между параметрами спектра коэффициента яркости и концентрациями хлорофилла и других примесей морской воды [1]. В качестве характеристики спектра использовался индекс цвета, так как спутниковые сканеры имели ограниченное число спектральных каналов. К сожалению, расчеты по простым эмпирическим формулам не дают хороших результатов при исследовании акваторий с небольшой изменчивостью индекса цвета. Кроме того, сопоставление результатов эмпирических алгоритмов с корабельными наблюдениями концентрации хлорофилла в Черном море показало их существенное рассогласование [2]. Поэтому создание регионального алгоритма обработки данных цветковых сканеров является актуальной проблемой для Черного моря.

Аналитический подход к решению обратных задач имеет большую информативность, поскольку позволяет восстанавливать не только концентрации оптически активных примесей морской воды, но и особенности их спектров поглощения, а также величину обратного рассеяния взвеси для зеленой области спектра.

**Методика.** Задача данного исследования состояла в определении концентраций пигментов фитопланктона и особенностей их спектров поглощения по спектру коэффициента яркости.

В настоящей работе применяется метод решения обратной задачи, разработанный для анализа коэффициента яркости моря, измеряемом в широком спектральном интервале

длин волн 360-700 нм [3]. Экспериментальные исследования проводились с 31 августа по 14 сентября 2004 г на океанографической платформе, расположенной в 600 м от берега вблизи пос. Кацивели. В течение всего периода проводились измерения оптических свойств моря и атмосферы, а также велись стандартные гидрологические и метеорологические наблюдения. Параллельно проводились стандартные биологические определения по пробам вод с разных горизонтов.

В эксперименте на океанографической платформе измерения коэффициента яркости моря проводились с помощью разработанного в лаборатории отдела оптики МГИ НАН Украины универсального спектрофотометра, позволяющего решать разнообразные подспутниковые задачи оптико-биологического направления [4]. В нем предусмотрена возможность измерения углового распределения спектральной яркости восходящего излучения моря или яркости небосвода, нормированных на спектральную облученность поверхности моря. Прибор обеспечивает высокую точность измерений в широком спектральном диапазоне, охватывающем всю видимую область спектра. Развертка по спектру производится при помощи зеркально-призменного монохроматора SPM-1 («Карл Цейс Йена»). В отличие от дифракционного монохроматора, использовавшегося в старой версии спектрофотометра, призма не дает погрешности в красной области спектра, появлявшейся вследствие наложения спектра второго порядка, однако и не позволяет проводить измерения в ближней ультрафиолетовой области из-за особенностей конструкции прибора.

После измерения общего коэффициента яркости поверхности моря в поле зрения канала яркости устанавливается 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 в последующем вычитаются из спектров общего коэффициента яркости с целью определения коэффициента яркости воды, что обеспечивает также компенсацию приборной погрешности [4].

При помощи универсального спектрофотометра были получены спектры коэффициента яркости в интервале длин волн 390-720 нм с шагом 5 нм.

**Модель.** Для решения обратных задач восстановления оптических свойств морской

воды по коэффициенту яркости моря необходимо установить взаимно однозначное соответствие между измеренной величиной коэффициента яркости и первичными гидрооптическими характеристиками. Обычно для этого используется выражение для коэффициента яркости  $\rho$  оптически однородного полубесконечного слоя вида

$$\rho = k \frac{b_b}{a}, \quad (1)$$

где  $b_b$  – показатель обратного рассеяния морской воды,  $a$  – показатель поглощения,  $k$  – константа, зависящая от индикатрисы рассеяния и условий освещения. Как  $a$  так и  $b_b$  есть функции длины волны, которые определяются количественным и качественным составом веществ, растворенных и взвешенных в воде. 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 фитопланктона, поглощение неживой органикой и рассеяние взвесью.

Следуя [5], представим поглощение морской воды  $\alpha(\lambda)$  в виде:

$$\alpha(\lambda) = a_w(\lambda) + a_{pl}(\lambda) + a_{dm}(\lambda), \quad (2)$$

где  $\lambda$  – длина волны,  $a_w(\lambda)$  – поглощение чистой морской воды [6],  $a_{pl}(\lambda)$  – поглощение взвешенными частицами,  $a_{dm}(\lambda)$  – поглощение растворенным веществом. В свою очередь, поглощение взвешенным веществом можно представить как

$$a_{pl}(\lambda) = a_d(\lambda) + a_{plk}(\lambda), \quad (3)$$

где  $a_d(\lambda)$  – поглощение детритом,  $a_{plk}(\lambda)$  – поглощение клетками фитопланктона. Поскольку форма спектра поглощения детрита схожа со спектром поглощения растворенным веществом, на основании (3) представим (2) в виде

$$\alpha(\lambda) = a_w(\lambda) + a_{plk}(\lambda) + a_{dkm}(\lambda), \quad (4)$$

где  $a_{dkm}(\lambda)$  – поглощение неживой органикой. Общепринято считать, что спектр поглощения растворенным органическим веществом  $a_{dm}(\lambda)$  чаще всего описывается формулой

$$a_{dm}(\lambda) = C_{dkm} \exp[-\alpha(\lambda - \lambda_0)], \quad (5)$$

где  $C_{dkm}$  – поглощение неживой органикой на

длине волны  $\lambda_0$ , а  $\alpha$  равно в среднем  $0,015 \text{ нм}^{-1}$ . Из литературы известно, что значение параметра  $\alpha$  может существенно отклоняться от среднего. Более низкие значения соответствовали растворенному веществу терригенного происхождения. Так как вблизи акватории океанографической платформы маловероятны интенсивные источники растворенного органического вещества терригенного происхождения, здесь следует использовать более высокие значения  $\alpha$ , чем  $0,015 \text{ нм}^{-1}$ . В данной работе по литературным данным [2, 3] для прибрежных вод используются значения  $\alpha = 0,017$  и  $0,02 \text{ нм}^{-1}$ .

Спектральный показатель  $a_{ph}(\lambda)$  также нельзя считать постоянным, поскольку удельное поглощение фитопланктона ( $a_{ph}^*(\lambda) = a_{ph}(\lambda)/C_{chl}$ ) зависит от количества пигментов и соотношения между фотосинтетическими и вспомогательными пигментами в клетке, причем количественные изменения в популяции фитопланктона влияют на спектр удельного поглощения таким образом, что при увеличении содержания пигментов в клетке максимум поглощения на  $440 \text{ нм}$  сглаживается.

Поглощение клетками фитопланктона записывается в виде

$$a_{ph}(\lambda) = C_{chl} a_{ph}^*(\lambda), \quad (6)$$

где  $a_{ph}^*(\lambda)$  удельное поглощение, которое также статистически зависит и от  $C_{chl}$ . В настоящей работе использовалась функция  $a_{ph}^*(\lambda)$  по модели [7] при  $C_{chl} = 0,75 \text{ мг/м}^3$  (см рис. 1).

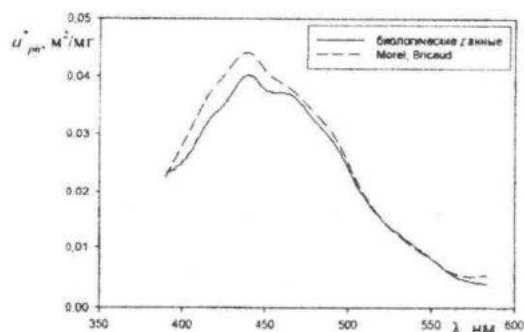


Рис. 1 – Сопоставление модельного спектра удельного поглощения пигментов с биологическими данными [8]

Рассеяние в морской воде формируется за счет рассеяния самой чистой водой и рассеяния на частицах биологической и минеральной взвеси, которое зависит главным образом от их концентраций и распределения частиц по размерам. Спектральный показатель рассеяния воды хорошо известен, а спектр обратного рассеяния частиц взвеси можно аппроксимировать степенной зависимостью Ангстрема,

тогда модель обратного рассеяния морской водой можно представить в виде

$$b_b(\lambda) = b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda), \quad (7)$$

где  $b_b(\lambda)$  – общий показатель обратного рассеяния,  $b_{bw}(\lambda)$  – показатель обратного рассеяния чистой воды,  $b_{bp}(\lambda)$  – показатель обратного рассеяния частиц взвеси.

Для решения обратной задачи предложено 3-параметрическое представление свойств морской воды, основанное на проведенном выше анализе особенностей рассеяния и поглощения. Модель поглощения морской водой приведена к виду

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + C_{chl} a_{chl}^*(\lambda) + C_{ddm} e^{-\alpha(\lambda-\lambda_0)}, \quad (8)$$

где  $a_{chl}^*(\lambda)$  – удельное поглощение пигментами. Модель обратного рассеяния учитывает свойства чистой воды и частиц взвеси

$$b_b(\lambda) = b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda_0) \frac{\lambda_0}{\lambda}. \quad (9)$$

Подставляя (8) и (9) в (1), получаем

$$\rho = k \frac{b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda_0) \frac{\lambda_0}{\lambda}}{a_w(\lambda) + C_{chl} a_{chl}^*(\lambda) + C_{ddm} e^{-\alpha(\lambda-\lambda_0)}} \quad (10)$$

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, то есть к решению системы уравнений

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

Такая минимизация дает решение математической задачи, не принимая во внимание приближенность 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.

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. В синей области доминирует поглощение растворенными органическими веществами и детритом, уменьшаясь с ростом длины волны. Известно, что максимум удельного поглощения фитопланктона подвержен большей изменчивости при изменении размерного состава фитопланктона, относительного содержания пигментов и пигментного состава, поэтому в области 420 – 460 нм расчеты не проводятся. Поглощение желтого вещества будет определяться в синей, а поглощение пигментов фитопланктона – в зеленой области спектра. Математически это выглядит как разделение системы уравнений следующим образом,

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial f(b_{bp}, C_{chl})}{\partial b_{bp}} \right|_{\lambda_1=460}^{\lambda_2=550} = 0 \\ \left. \frac{\partial f(b_{bp}, C_{chl})}{\partial C_{chl}} \right|_{\lambda_1=460}^{\lambda_2=550} = 0 \\ \left. \frac{\partial f(C_{ddm})}{\partial C_{ddm}} \right|_{\lambda_1=390}^{\lambda_2=420} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

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 двух переменных  $b_{bp}(\lambda_0)$  и  $C_{chl}$  при  $\lambda_1 = 460$  нм и  $\lambda_2 = 550$  нм, считая в первом приближении концентрацию растворенного органического вещества равной нулю.

Рассчитанные величины используются для анализа спектров поглощения в синей области. Преобразуя выражение, как это было сделано в [3] и минимизируя его как функцию  $C_{ddm}$  при  $\lambda_1 = 390$  нм и  $\lambda_2 = 420$  нм, находим значение  $C_{ddm}$  в первом приближении. Полученную оценку используем для нахождения  $b_{bp}(\lambda_0)$  и  $C_{chl}$  в спектральном диапазоне 460 – 550 нм. Таким образом, получаем итерационный алгоритм, позволяющий при заданном  $\alpha$  рассчитывать параметры  $C_{ddm}$ ,  $b_{bp}(\lambda_0)$  и  $C_{chl}$ .

Поскольку спектр поглощения пигментами содержит информацию о биологическом состоянии фитопланктона, рассчитывались также и спектры удельного поглощения фито-

планктона  $a_{ph}^*(\lambda)$  по формуле

$$a_{ph}^* = \frac{1}{C_{chl}} \left[ \frac{k \cdot b_b(\lambda)}{\rho_e(\lambda)} - a_w(\lambda) - C_{ddm} e^{-\alpha(\lambda - \lambda_0)} \right]$$

**Результаты решения обратной задачи биооптики моря.** На рисунке 2 представлены результаты восстановления различных биологических характеристик по данным измерений коэффициента яркости моря с океанографической платформы.

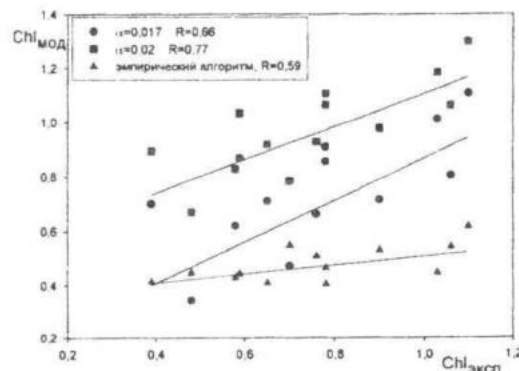


Рис. 2 – Сравнение расчетной и измеренной концентраций хлорофилла

Для сравнения приведены данные прямых биологических определений концентрации хлорофилла «а» и феофитина и величины концентраций хлорофилла при различных значениях параметра спектрального наклона  $\alpha$ , полученные в результате моделирования.

Рассчитанные значения концентрации хлорофилла хорошо коррелируют с данными прямых биологических измерений (величины коэффициентов корреляции приведены на графике). На графике также приведены результаты расчетов по эмпирическим формулам [2], которые наиболее адекватно из остальных подобных описывают экспериментальные данные. По сравнению с ними наблюдается лучшая корреляция результатов расчета с биологическими данными. Кроме того, расчетные величины концентраций ближе к биологическим данным, чем полученные эмпирическим путем. Это частично объясняется тем, что эмпирический алгоритм [2] не предназначен для прибрежных районов Черного моря.

На рисунке 3 представлены спектры измеренного и модельного коэффициента яркости. Из рисунков видно, что модельный спектр плохо аппроксимирует измеренный спектр коэффициента яркости.

Все полученные спектры поглощения пигментов (рис. 4) имеют форму, характерную для поглощения хлорофилла. Кроме того, на них присутствуют локальные максимумы на

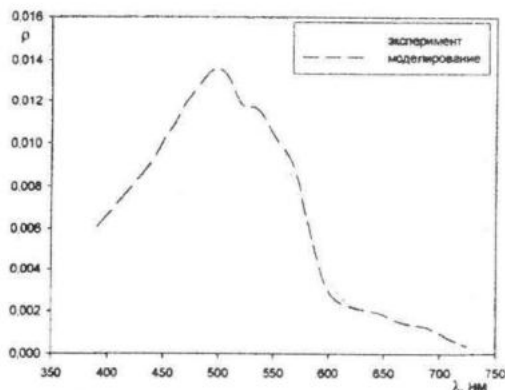


Рис. 3 – Спектры расчетного и экспериментального коэффициента яркости

длинах волн 570 нм, обусловленный поглощением цианобактериями, и 412 нм, соответствующий полосе поглощения бактериородопсина.

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 поглощение их жестко задается моделью, то особенности их спектров были восприняты как побочные пики поглощения пигментов.

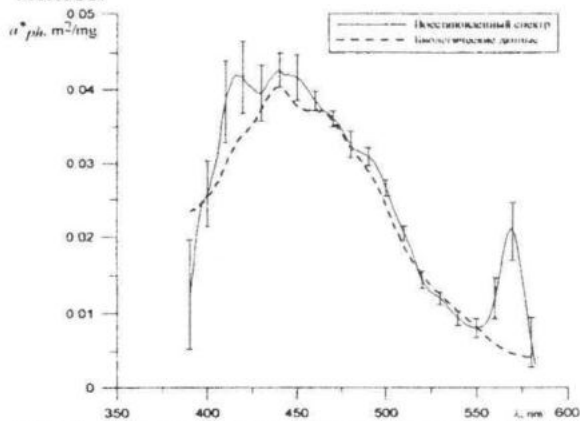


Рис. 4 - Сравнение расчетного и измеренного спектра поглощения пигментов.

**Выводы.** Проведение спектральных измерений коэффициента яркости в видимом диапазоне позволяет решить обратную задачу биооптики моря и определить спектры поглощения компонентов морской воды. В ходе апробации алгоритма на данных судовых измерений и измерений с гидрологической платформы выяснилось, что алгоритм устойчив к случайным ошибкам.

Предлагаемая модель оптических свойств морской воды дает удовлетворительную оценку концентрации хлорофилла и поглощения желтым веществом.

По сравнению с эмпирическими алгоритмами предложенный метод дает лучшее соответствие результатов с данными биологических определений. В процессе решения обратной задачи и анализа полученных результатов было показано, что некоторые эмпирические представления о биооптических свойствах примесей, содержащихся в морской воде, не соответствуют действительности. Например, предположение об однозначной связи желтого вещества и хлорофилла не подтверждается аналитическими расчетами.

Спектр поглощения фитопланктона обнаруживает дополнительные максимумы, некоторые из которых превышают основной максимум поглощения хлорофилла "а". Исследование полученных спектров поглощения фитопланктона позволяет определять наличие микроорганизмов, не обнаруживаемых стандартными биологическими методами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. O'Reilly J.E., Maritorena S., Mitchell B.G. et al. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS // J. Geophys. Res. – 1998. – 103. – P. 24937 – 24953.
2. Суетин В.С., Суслин В.В., Королев С.Н. и др. Оценка изменчивости оптических свойств воды в Черном море летом 1998 года по данным спутникового прибора SeaWiFS // Морской гидрофизический журнал. – 2002. – № 6. – С. 44 – 54.
3. Шибанов Е.Б., Лу М.Е. Метод решения обратной задачи биооптики моря по данным подспутникового эксперимента на океанографической платформе // Морской гидрофизический журнал. – 2000. – № 3. – С. 50 – 63.
4. Лу 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. МГИ НАНУ, Севастополь, 2000. С. 163 – 173.
5. Sosik H.M., Mitchell B.G. Light absorption by phytoplankton, photosynthetic pigments and detritus in California Current System // Deep-Sea Res. – 1995. – Vol. 42, No 10. – P. 1717 – 1748.
6. Smith R.C., Baker K.S. Optical properties of clearest natural waters (200 – 800 nm), Appl. Opt., 20, 1981. P. 177 – 184.
7. 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. – P. 13321 – 13332.
8. Коротаев Г.К., Хоменко Г.А., Шами М. и др. Международный подспутниковый эксперимент на океанографической платформе (пос. Кацивели) // Морской гидрофизический журнал. – 2004. – № 3. – С. 28 – 38.