

ВОССТАНОВЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИЙ ОПТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ПРИМЕСЕЙ МОРСКОЙ ВОДЫ В УСЛОВИЯХ БОЛЬШОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ КОНЦЕНТРАЦИИ ВЗВЕСИ

Е.Н. Корчемкина, Е.Б. Шибанов

Морской гидрофизический институт
НАНУ, отдел оптики моря,
e-mail: lee@alpha.mhi.iuf.net

Исследуется применимость регионального аналитического алгоритма восстановления биооптических свойств морской воды к условиям массового развития кокколитофорид. Для расчетов используются модельные спектры коэффициента яркости. Найдены диапазоны концентрации взвеси, ограничивающие применение алгоритма. Используемое условие постоянства коэффициента яркости на длине волны 400 нм позволяет стабилизировать работу алгоритма.

Введение. Целью дистанционного зондирования является определение концентраций примесей морской воды по данным измерений восходящего излучения моря. Анализ данных спутниковых сканеров цвета моря предполагает учет вклада атмосферы в восходящую яркость, поскольку доля сигнала моря в общем сигнале мала. Стандартные методы атмосферной коррекции предполагают равенство нулю яркости моря в инфракрасной части спектра. Последующая модельная экстраполяция значения атмосферной дымки в видимую область может приводить к большим ошибкам в последующем определении коэффициента яркости в коротковолновой области. Данные восходящего излучения на 412 и 443 нм, измеренные со спутника, обычно не анализируются [1] вследствие роста ошибок с уменьшением длины волны. Наличие даже приблизительной оценки особенностей отражения света морем на границе диапазона измерений в синей области позволило бы значительно повысить точность атмосферной коррекции в других спектральных каналах, например, как это было показано в [2]. При этом величина коэффициента яркости в синей области не имеет существенного значения, так как она мала по сравнению с общим сигналом. В качестве параметризации предлагается использовать условие

постоянства коэффициента яркости на длине волны 412 нм. Выполнение данного условия возможно, если величина показателя обратного рассеяния линейно связана с поглощением на длине волны 412 нм. Это предположение статистически выполняется, по крайней мере, для летнего периода в открытой части Черного моря, что было подтверждено данными Международного подспутникового эксперимента [3]. Наличие статистической связи поглощения и обратного рассеяния может быть вызвано влиянием детрита как на рассеивающие, так и на поглощающие свойства морской воды.

Существенное изменение регрессионной зависимости поглощения на 412 нм и обратного рассеяния может произойти вследствие возрастания количества мелкой минеральной взвеси (вынос рек, цветение кокколитофорид), что отразится на величине коэффициента яркости в синей области спектра. В реальных условиях вынос рек содержит не только взвесь, но и большое количество растворенной органики. Возрастание рассеяния при массовом развитии кокколитофорид приводит к гибели фитопланктона из-за уменьшения освещенности и образованию большого количества детрита. В обоих случаях увеличение рассеяния будет сопровождаться ростом поглощения. По причине отсутствия соответствующих экспериментальных данных рассматривается модель оптических свойств воды, когда увеличивается только обратное рассеяние. Сохранение величины поглощения на прежнем уровне приведет к увеличению коэффициента яркости, что менее всего согласуется с вводимым условием постоянства. Введение такой модельной помехи позволяет исследовать чувствительность алгоритма к изменениям биооптических условий.

Задачами данной работы являются:

- исследование влияния условия постоянства на результаты восстановления концентраций примесей аналитическим методом по данным с уровня поверхности;
- нахождение границ применимости предлагаемой параметризации при изменении биооптической ситуации;
- определение характерных значений коэффициента яркости моря в длинноволновой области видимого диапазона спектра при которых результаты алгоритма могут быть неадекватны.

Коррекция. Используемая коррекция спектров заключалась в приведении значений коэффициента яркости на концах диапазона измерений к постоянным значениям $\rho^*(400)=c_1=0,77\%$, $\rho^*(700)=c_2=0,03\%$, которые определялись как средние по всем имеющимся измерениям. Для этого вводилось поправочное слагаемое $C(\lambda)$, имеющее спектральный ход, соответствующий спектральному поведению света неба:

$$\rho^*(\lambda) = \rho(\lambda) + C(\lambda), \quad (1)$$

где

$$C(\lambda) = \frac{a(c_1, c_2)}{\lambda} + b(c_1, c_2). \quad (2)$$

Коэффициенты a и b вычислялись для каждого полученного спектра по формулам

$$a = \frac{\Delta_{700} - \Delta_{400}}{\frac{1}{700} - \frac{1}{400}}, \quad b = \Delta_{700} - \frac{a}{700}, \quad (3)$$

где

$$\Delta_{400} = C(400) = \rho^*(400) - \rho(400),$$

$$\Delta_{700} = C(700) = \rho^*(700) - \rho(700).$$

Алгоритм. Для решения обратной задачи восстановления оптических свойств морской воды используется модель коэффициента яркости моря, подробно описанная в [4]:

$$\rho = k \frac{b_{pw}(\lambda) + b_{hp}(\lambda_0) \frac{\lambda_0}{\lambda}}{a_w(\lambda) + C_{chl} a_{chl}^*(\lambda) + C_{ddm} e^{-\alpha(\lambda - \lambda_0)}}, \quad (4)$$

где $a_w(\lambda)$ – поглощение чистой морской водой [5] и $a_{chl}^*(\lambda)$ – удельное поглощение пигментов [6] – известные функции длины волны; общая концентрация пигментов фитопланктона C_{chl} , поглощение неживой органикой C_{ddm} и рассеяние взвесью $b_{hp}(\lambda_0)$ – параметры модели. Значение спектрального наклона поглощения неживой органики α принималось равным $0,02 \text{ nm}^{-1}$ по данным [7]. По данным индикатрис рассеяния [3] методом [8] был рассчитан коэффициент $k=0,15$.

Определение параметров модели производилось путем минимизации выражения

$$f = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} [\rho_c(\lambda) - \rho_m(\lambda)]^2$$

как функции каждого параметра. Для концентрации каждой примеси вычисления проводились на том спектральном участке, где ее поглощение проявляется наиболее существенно по сравнению с влиянием других компонентов. Поглощение желтого вещества определяется в синей области спектра ($\lambda_1=390 \text{ nm}$, $\lambda_2=395 \text{ nm}$), а поглощение пиг-

ментов фитопланктона – в области максимума их удельного поглощения ($\lambda_1=420 \text{ nm}$, $\lambda_2=460 \text{ nm}$). Обратное рассеяние взвесью рассчитывается в диапазоне $460 - 650 \text{ nm}$. Это дает возможность различить спектры поглощения, основываясь на известных общих закономерностях их поведения.

В первом приближении определяется рассеяние взвесью при условии, что остальные параметры модели равны нулю. Далее по найденному значению $b_{hp}(\lambda_0)$ определяются последовательно концентрация пигментов и поглощение неживой органикой. На их основе определяется новое значение $b_{hp}(\lambda_0)$. Таким образом, получаем итерационный алгоритм, позволяющий рассчитывать параметры C_{ddm} , $b_{hp}(\lambda_0)$ и C_{chl} . Для достижения условия остановки $|C_{chl}^i - C_{chl}^{i-1}| < 0,001$ требуется около 10 итераций.

Для исследования влияния коррекции на результаты восстановления восстановление концентраций примесей морской воды проводилось как по экспериментальным, так и по скорректированным спектрам коэффициента яркости.

Моделирование выноса взвеси. Для проведения численного эксперимента из экспериментальных данных за 2003 – 2004 г. [3] были получены модельные спектры коэффициента яркости. Вначале по экспериментальным спектрам без применения коррекции восстанавливались все концентрации примесей и спектр поглощения пигментов.

Затем строился модельный спектр коэффициента яркости

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

где C_{chl} , C_{ddm} , $b_{hp}(\lambda_0)$ и $a_{chl}^*(\lambda)$ – параметры и спектр поглощения пигментов, полученные в результате восстановления. Таким образом, информация об естественных особенностях спектра коэффициента яркости не утрачивалась при аппроксимации, а сохранялась в виде спектра поглощения пигментов и переносилась на модельный спектр.

Обратное рассеяние кокколитов моделировалось выражением

$$b_{h_coccol}(\lambda) = b_{h_coccol}(546) \cdot (546/\lambda)^v, \quad (6)$$

где $b_{h_coccol}(546) = 1,1 \cdot 10^{-13} C_{coccol}$, C_{coccol} – порядка $10^{10} - 10^{11} \text{ m}^{-3}$, $v=0,8$ по данным [9].

Далее проводилась коррекция модельных спектров коэффициента яркости, затем по скорректированным спектрам восстанавливались параметры модели C_{chl} , $b_{hp}(\lambda_0)$ и C_{chl} .

Результаты. Сравнение результатов восстановления при применении коррекции и без нее показано на рисунке 1. Влияние коррекции на результаты восстановления проявляется таким образом, что модельные значения концентраций численно лучше соответствуют биологическим данным, разброс данных относительно линии регрессии становится меньше. Кроме того, снижается чувствительность модели к погрешностям измерений и к изменению входных параметров модели.

На рисунке 2 представлена последовательность преобразований спектра коэффициента яркости: экспериментальный, модельный, скорректированный и расчетный

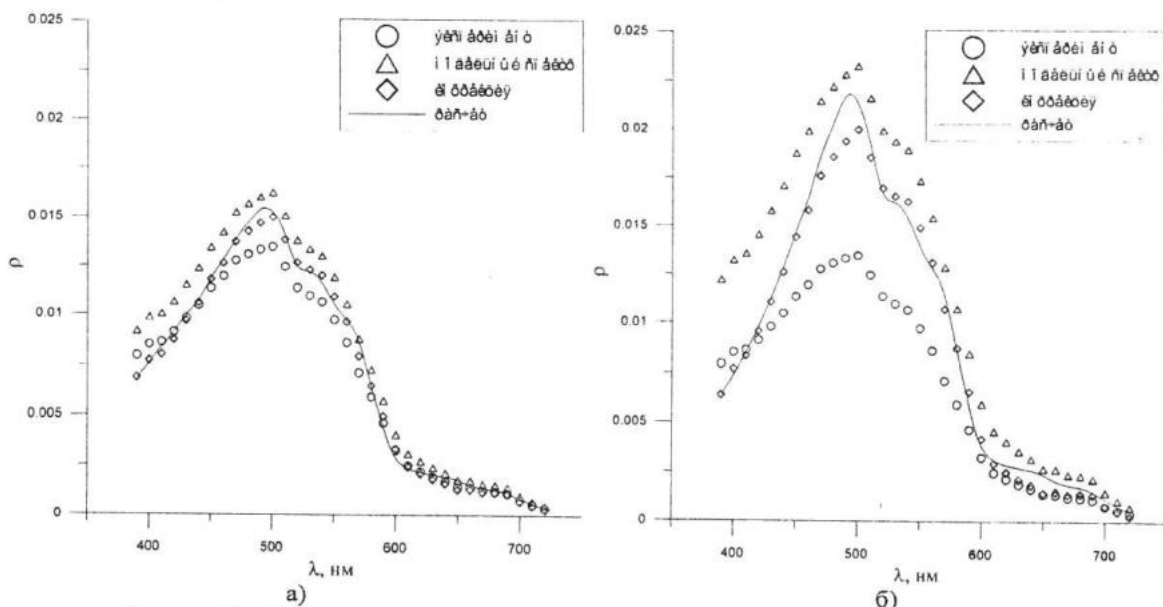


Рисунок 2 – Экспериментальные и модельные спектры коэффициента яркости
а) $C_{coccol} = 1 \cdot 10^{10} \text{ M}^{-3}$, б) $C_{coccol} = 3 \cdot 10^{10} \text{ M}^{-3}$

Значение отношения $\rho_{\text{мод}}/\rho_{\text{экл}}$ (рис. 3) возрастает с длиной волны, то есть влияние мелкой взвеси более существенно в красной области. Предлагается использовать значение коэффициента яркости на красном конце спектра в качестве критерия применимости алгоритма к данному спектру, поскольку оно может быть определено дистанционно.

Выход восстановленной концентрации хлорофилла за пределы ошибки восстановления означает недостоверность полученных результатов. Это происходит при концентрации кокколитов $3,5 \cdot 10^{10} \text{ M}^{-3}$, ей соот-

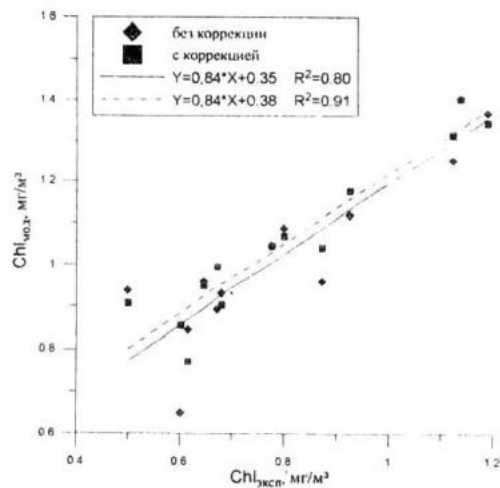


Рисунок 1 – Влияние коррекции на восстановленные концентрации пигментов

спектры, для различных входных концентраций взвеси.

ответствует среднее значение коэффициента яркости на длине волны 700 нм 0,16%, и максимальное значение 1,9%. Изменение значения коэффициента яркости в красной области с 0,03% до 0,16% превышает уровень атмосферных шумов в красной области спектра и может быть зарегистрировано спутниковыми сканерами.

Значения яркости на красном и синем концах спектра могут быть связаны. Их функциональная зависимость может меняться при изменении концентрации кокколитов. Следовательно, необходимо устано-

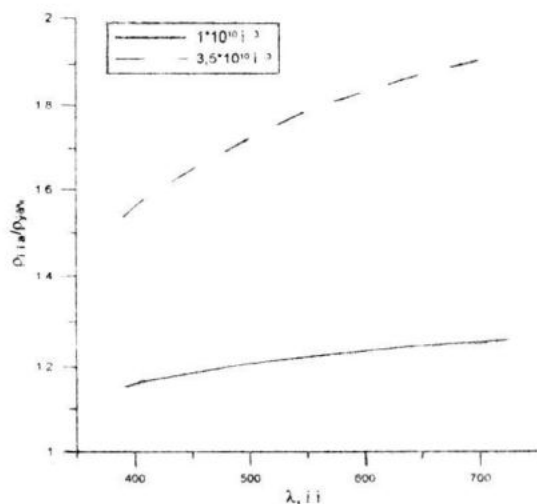


Рисунок 3 – Отношение модельного коэффициента яркости к экспериментальному

вить эту зависимость и учитывать ее при выполнении коррекции. Тогда по значению в красной области можно определить значение в синей и выполнять коррекцию на него. Однако и при неверном предположении о значении коэффициента яркости на границах диапазона измерений алгоритм еще дает разумные результаты. Поэтому связь не обязательно должна быть четкой, с малой погрешностью. Для ее установления необходимо иметь экспериментальные данные коэффициента яркости для реальных выбросов большого количества минеральной взвеси.

Заключение. Получен алгоритм, позволяющий восстанавливать концентрации пигментов фитопланктона. Полученные значения концентрации хорошо коррелируют с биологическими данными. Алгоритм слабо чувствителен к погрешностям модели и измерений. Предлагаемая коррекция данных способствует снижению чувствительности к изменению входных параметров.

По значению коэффициента яркости в красной области можно определить применимость алгоритма к конкретному спектру. По имеющимся данным предельное значение ρ_{700} составляет 0,16%, что намного превышает среднее значение ρ_{700} при отсутствии кокколитов. Таким образом, алгоритм предназначен для анализа спектров коэффициента яркости в этом диапазоне значений.

Даже для начальных стадий цветения алгоритм дает разумные результаты, предельная концентрация составляет 30% от максимальной при цветении.

Для аналитической оценки биооптических параметров кокколитов во время цветения может потребоваться изменение используемой в алгоритме параметризации. Кроме того, для установления зависимости между значениями коэффициента яркости на концах спектра необходимы натурные измерения коэффициента яркости с уровня поверхности при различных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.С. Суетин, Е.Н. Сычев, В.В. Суетин и др. Устранение аэрозольных искажений при анализе данных наблюдений Черного моря цветным сканером CZCS со спутника Nimbus-7 // Морской гидрофизический журнал, 1997. – № 4. – С. 71 – 79.
2. С.В. Паршиков, М.Е. Ли Дистанционное зондирование оптически активных примесей с применением коротковолнового участка спектра // Автоматизированные системы контроля состояния морской среды. – Севастополь: МГИ АН Украины, 1992. – С. 65 – 78.
3. M. Chami, E.B. Shybanov, G.A. Khomenko et al., Spectral variation of the volume scattering function measured over the full range of scattering angles in a coastal environment // Appl. Optics, 2006. – 45, № 15 – P. 3605 – 3619.
4. Е.Н. Корчемкина, Е.Б. Шибанов Метод определения спектрального показателя поглощения фитопланктона по коэффициенту яркости моря // Системы контроля окружающей среды, МГИ НАН Украины, Севастополь, 2005. – С. 90 – 94.
5. R.C. Smith, K.S. Baker Optical properties of clearest natural waters (200 – 800 nm) // Appl. Optics, 1981. – 20, № 2. – P. 177 – 184.
6. A. Bricaud, M. Babin, A. Morel et al. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization // J. Geophys. Res., 1995. – 100. – P. 13321 – 13332.
7. Т.Я. Чурилова, Г.П. Берсенева 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.
8. Е.Б. Шибанов Численный метод решения уравнения переноса. Коэффициенты отражения и пропускания оптически тонкого плоскопараллельного слоя // Морской гидрофизический журнал, 2005. – №3. – С 62 – 71.
9. Многолетняя изменчивость прозрачности воды в Черном море и факторы, обусловившие ее сильное снижение в конце 80-х – начале 90-х годов. / В.И. Маньковский, В.Л. Владимиров, Е.И. Афонин и др. – Севастополь, 1996. – 32 с. – (Препр. НАН Украины. МГИ).