

Е. Н. Корчёмкина, Е. Б. Шибанов

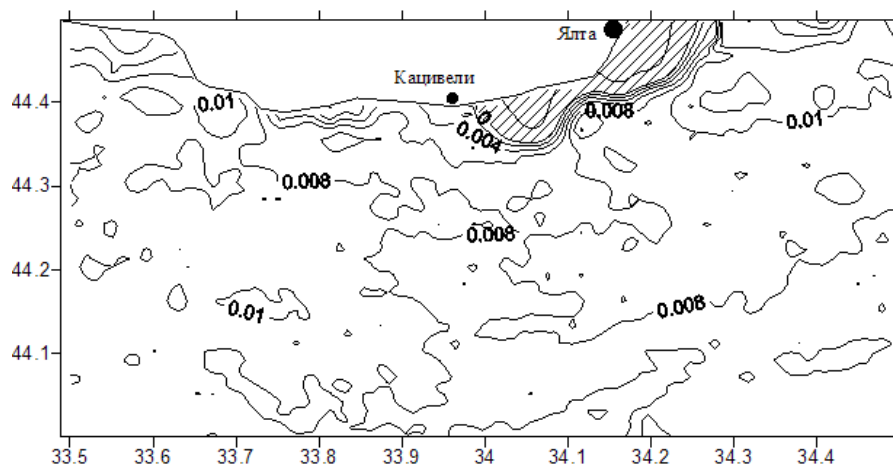
*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь***УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ДИСТАНЦИОННОГО
ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПИГМЕНТОВ ФИТОПЛАНКТОНА**

Рассматривается способ коррекции спутниковых измерений коэффициента яркости, дополняющий стандартные способы атмосферной коррекции. Для оценки отражения света морем в синей области предлагается использовать постоянное значение коэффициента яркости моря на длине волны 412 нм; приводится обоснование этого предположения. Предлагается способ определения спектральной зависимости корректировочного слагаемого. По спутниковым данным с использованием разработанного ранее аналитического алгоритма были восстановлены концентрации примесей морской воды. Построены карты распределения хлорофилла в исследуемом районе. Полученные величины концентраций соответствуют типичным для прибрежных районов Черного моря в летний период.

Наиболее удобной гидрооптической характеристикой для проведения глобальных дистанционных исследований биооптических свойств поверхностных вод является коэффициент яркости. 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. Данные восходящего излучения на 412 и 443 нм, измеренные со спутника, обычно не анализируются [1] вследствие роста ошибок с уменьшением длины волны, которые выражаются в появлении отрицательных значений коэффициента яркости (рис. 1).

Наличие информации об особенностях отражения света морем в синей области позволило бы значительно повысить точность атмосферной коррекции. Например, в [2] предлагалось считать постоянной величину коэффициента яркости и в синей области спектра, а не только в красной, как это делается в стандартных методиках атмосферной коррекции [3]. Задачей нашего исследования является подробная разработка методики коррекции коэффициента яркости с применением условия постоянства в синей области спектра.

В работе используются данные, полученные со спутника *SeaWiFS*, для района Южного берега Крыма (44°00' – 44°30' с.ш., 33°30' – 34°30' в.д.). Они включают спектры восходящей облученности на верхней границе атмосферы, а также рассчитанные по ним с применением атмосферной коррекции спектры коэффициента яркости моря.



Р и с . 1 . Распределение коэффициента яркости на длине волны 412 нм за 1 сентября 2004 г. Области с отрицательными значениями обозначены штриховкой.

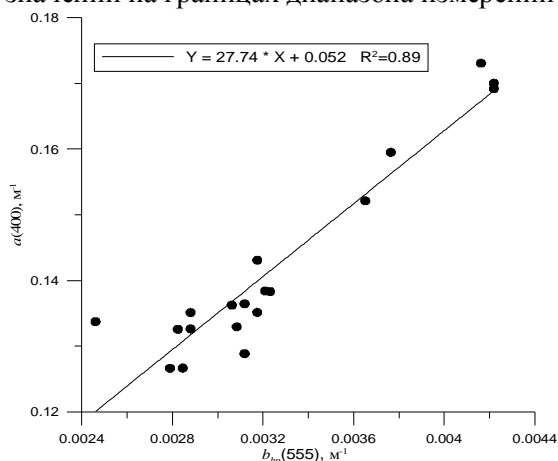
Используемое условие постоянства коэффициента яркости будет выполняться, если поглощение в синей области спектра линейно связано с обратным рассеянием

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

Анализ экспериментальных измерений индикатрис рассеяния и поглощения примесей морской воды показывает, что такая связь наблюдается, по крайней мере, в летний период в Черном море (рис.2) [4].

Таким образом, предлагается корректировать экспериментальные спектры коэффициента яркости, прошедшие атмосферную коррекцию, путем введения поправочного слагаемого, зависящего от выбранных постоянных значений на границах диапазона измерений $\rho^*(412)$ и $\rho^*(665)$:

$$\rho^*(\lambda) = \rho(\lambda) + C(\lambda) . \quad (2)$$



Р и с . 2 . Корреляция между обратным рассеянием на частицах на 555 нм и поглощением примесей на 412 нм.

В качестве постоянных значений на краях видимой области были приняты средние величины коэффициента яркости, полученные в подспутниковом эксперименте [5] $\rho^*(412) = 0,77 \%$, $\rho^*(665) = 0,15 \%$. Коэффициент яркости уменьшается к обоим краям видимой области, тогда как его погрешность уменьшается с ростом длины волны. Поэтому влияние ошибки в оценке $\rho^*(412)$ будет ниже для тех длин волн, где производит-

ся вычисление концентрации хлорофилла. Ошибки в красной области не существенны вследствие малых значений $\rho^*(665)$.

Для определения спектральной зависимости $c(\lambda)$ определен спектральный ход ошибок атмосферной коррекции. Данные были разделены на группы по величине атмосферной составляющей коэффициента яркости. Вклад атмосферы определялся по значению полной облученности снизу на верхней границе атмосферы, на длине волны 865 нм, т.к. в красной области спектра коэффициент яркости моря пренебрежимо мал. С возрастанием вклада атмосферы в общий сигнал будет расти и ошибка атмосферной коррекции. Изменчивость коэффициента яркости объясняется влиянием моря либо атмосферы, поэтому разделение данных позволяет проследить изменение влияния ошибок атмосферной коррекции с ростом атмосферной составляющей. Для этого проведен ковариационный анализ спектров коэффициента яркости моря, полученных стандартным методом атмосферной коррекции. Рассчитаны собственные векторы ковариационной матрицы для коэффициента яркости (рис.3). Первый собственный вектор объясняет отклонение от среднего значения на 65 – 85 %. Для случая максимального вклада атмосферы его можно рассматривать как ошибку определения свойств аэрозоля из-за несоответствия используемой для коррекции модели реальным свойствам аэрозоля. Было получено выражение, наилучшим образом аппроксимирующее первый собственный вектор, которое и было использовано в дальнейшем для коррекции данных (рис.4).

Таким образом,

$$C(\lambda) = \frac{a}{\lambda^2} + b, \quad (3)$$

где a и b находятся для каждого спектра из условия

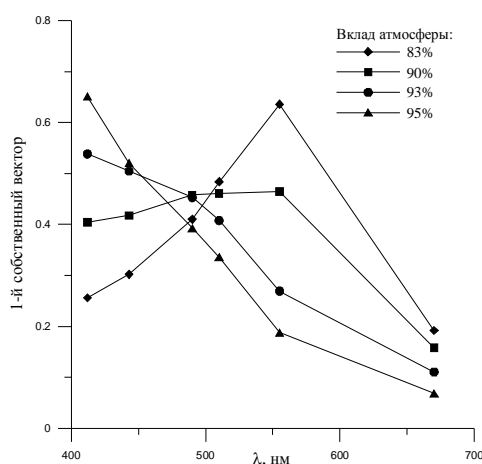


Рис. 3. Поведение первого собственного вектора с изменением вклада атмосферы в восходящую облученность.

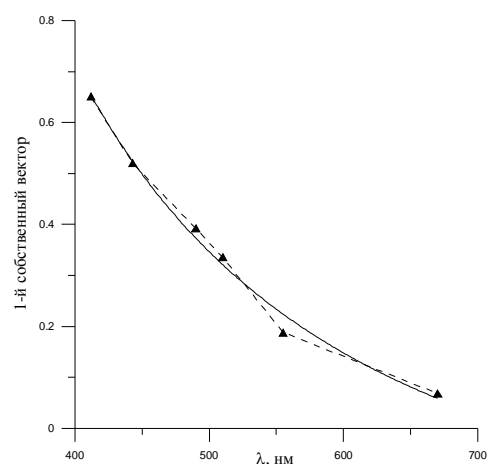


Рис. 4. Для случая максимального вклада атмосферы первый собственный вектор аппроксимируется уравнением $y = a/x^2 + b$, коэффициент корреляции составляет 0,99.

$$\begin{cases} C(412) = \rho^*(412) - \rho(412) = \frac{a}{412^2} + b, \\ C(665) = \rho^*(665) - \rho(665) = \frac{a}{665^2} + b, \end{cases} \quad (4)$$

$\rho(412)$ и $\rho(665)$ – исходные значения коэффициента яркости.

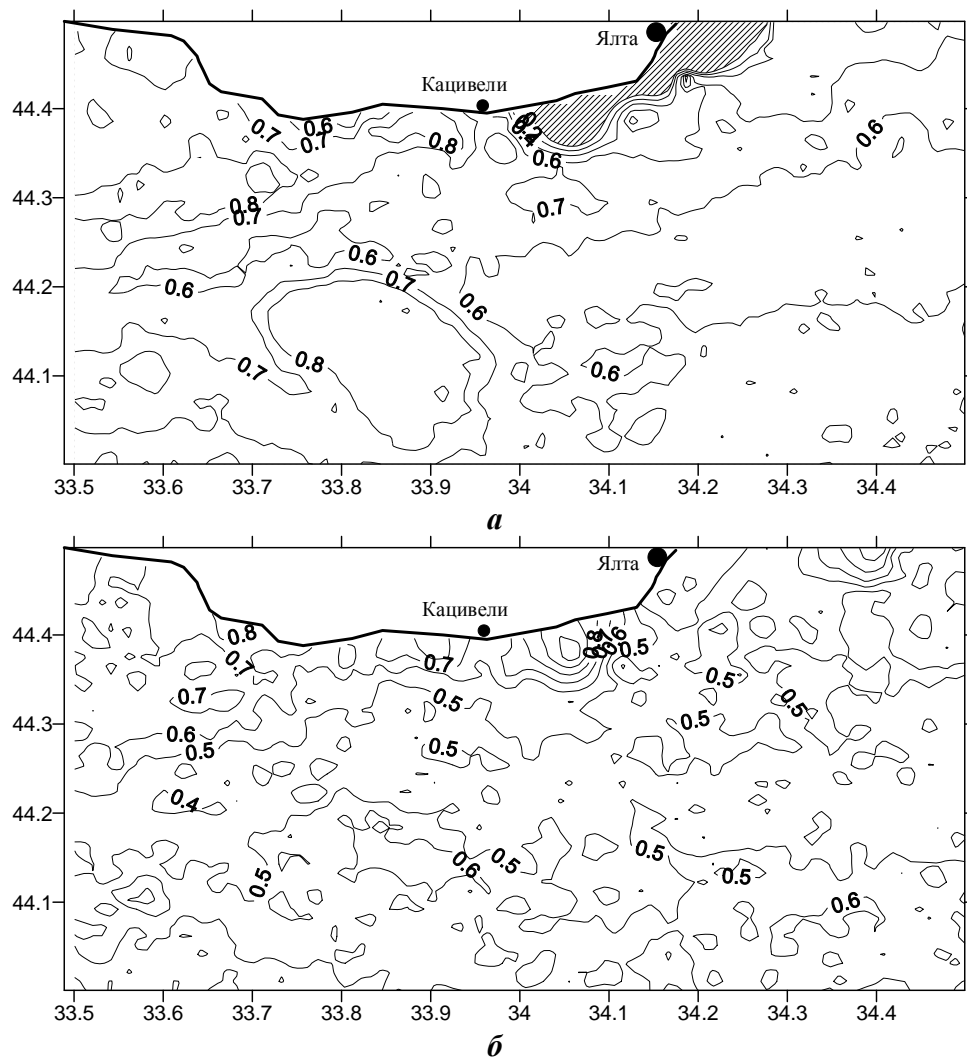
Решая систему (4), получаем

$$a = \frac{C(665) - C(412)}{\frac{1}{665^2} - \frac{1}{412^2}}, \quad b = C(665) - \frac{a}{665^2}.$$

При помощи разработанного ранее аналитического алгоритма, описанного в [6], были восстановлены концентрации примесей морской воды. Для описания биооптических свойств морской воды используется трехпараметрическая модель коэффициента яркости. Такая задача в общем случае является неустойчивой, однако благодаря используемому оригинальному методу минимизации она сводится к поиску минимума функции одной переменной. Получаемый в результате разброс концентраций пигментов оказывается ниже, чем при решении однопараметрической задачи.

В [6] было показано, что применение коррекции к данным, полученным с поверхности, слабо влияет на восстановленные значения концентраций примесей. Значения коэффициентов корреляции восстановленных концентраций с данными биологических измерений при применении коррекции исходных данных выше, чем без нее. Это свидетельствует в пользу того, что реальный разброс значений коэффициента яркости 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.

Для расчетов использовались спутниковые данные коэффициента яркости моря, скорректированные предлагаемым методом. На рис.5 сравниваются карты распределения концентрации хлорофилла, рассчитанная предлагаемым методом и построенная по данным *SeaWiFS*. Полученные значения соответствуют типичным для исследуемого района [7]. На карте, полученной по данным *SeaWiFS* (рис.5, а), отсутствует часть данных, соответствующая отрицательным значениям $\rho(412)$ (рис.1). Потеря данных обусловлена принципиальными сложностями определения характеристик аэрозоля в коротковолновой области по измерениям в инфракрасном диапазоне. Изолинии концентрации пигментов повторяют форму пробела в данных, так что структура изолиний восстановленного хлорофилла в этой области скорее обусловлена ошибками атмосферной коррекции, чем распределением хлорофилла в море. Также наблюдается уменьшение концентраций хлорофилла до $0 - 0,2 \text{ мг/м}^3$, около побережья Ялты. Однако низкие значения концентраций характерны только при сгоне, которого не наблюдалось во время подспутникового эксперимента. Использование предлагаемой коррекции позволяет избежать потери данных с отрицательными значениями в синей области, которые возникают при больших ошибках атмосферной коррекции (рис.5, б).



Р и с . 5 . Карты распределения хлорофилла за 1 сентября 2004 г.: по данным *SeaWiFS* (область с отсутствующими данными заштрихована) (а), восстановленная с применением предлагаемой коррекции (б).

Структура поля концентраций хлорофилла более типична для исследуемого района, величины полученных концентраций составляют в среднем $0,7 \text{ мг/м}^3$. Распределение хлорофилла почти однородно в открытой части моря, вблизи берега наблюдаются несколько максимумов концентрации. Эти максимумы хорошо соответствуют выносу минеральных и органических веществ с городскими и промышленными стоками.

Выводы. Предложен метод усовершенствования методики атмосферной коррекции, основанный на экспериментально наблюдавшейся линейной зависимости поглощения и рассеяния. Показано, что даже при использовании приближенной оценки коэффициента яркости на длине волны 412 нм возможно избежать ошибок восстановления концентраций примесей мор-

ской воды. Использование такого предположения снижает влияние ошибок атмосферной коррекции и позволяет использовать для расчета концентраций пигментов на исследуемой акватории все имеющиеся данные независимо от значений в синей области спектра.

На основании ковариационного анализа спутниковых данных коэффициента яркости определена спектральная зависимость погрешности атмосферной коррекции. Спектр корректировочного слагаемого выбран в соответствии с найденной зависимостью.

По спутниковым данным с применением разработанного ранее аналитического алгоритма были восстановлены концентрации примесей морской воды. Построены карты распределения хлорофилла в исследуемом районе. Полученные величины концентраций соответствуют типичным для исследуемого района в летний период.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Суетин В.С., Сычев Е.Н., Суслин В.В. и др.* Устранение аэрозольных искажений при анализе данных наблюдений Черного моря цветовым сканером CZCS со спутника *Nimbus-7* // Морской гидрофизический журнал.– 1997.– № 4.– С.71-79.
2. *Паришков С.В., Ли М.Е.* Дистанционное зондирование оптически активных примесей с применением коротковолнового участка спектра// Автоматизированные системы контроля состояния морской среды.– Севастополь: МГИ НАН Украины, 1992.– С.65-78.
3. *Gordon H.R., Wang M.* Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with *SeaWiFS*: a preliminary algorithm // *Appl. Optics.*– 1994.– 33, № 3.– P.443-452.
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 // *Appl. Optics.*– 2006.– 45, № 15.– P.3605-3619.
5. *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.
6. *Корчемкина Е.Н., Шибанов Е.Б.* Восстановление концентраций оптически активных примесей морской воды в условиях большой изменчивости концентрации взвеси // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2006.– С.90-94.
7. *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.

Материал поступил в редакцию 15.05.2008 г.