

Проявление особенностей оптических свойств атмосферного аэрозоля над Черным морем при интерпретации данных спутникового прибора *SeaWiFS*

Рассматривается задача количественного определения оптических характеристик морской воды по спутниковым измерениям. Установлены основные физические механизмы, приводящие к ошибкам выполнения атмосферной коррекции по применяемому в *NASA* стандартному алгоритму. Показано несоответствие реализованных в этом алгоритме моделей атмосферного аэрозоля его фактическим свойствам над Черным морем.

Работающие в видимом диапазоне электромагнитного спектра спутниковые приборы такого типа, как *Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS)*, могут быть полезными для проведения широкого круга исследований [1]. Примеры результатов наблюдения Черного моря приведены в [2 – 4].

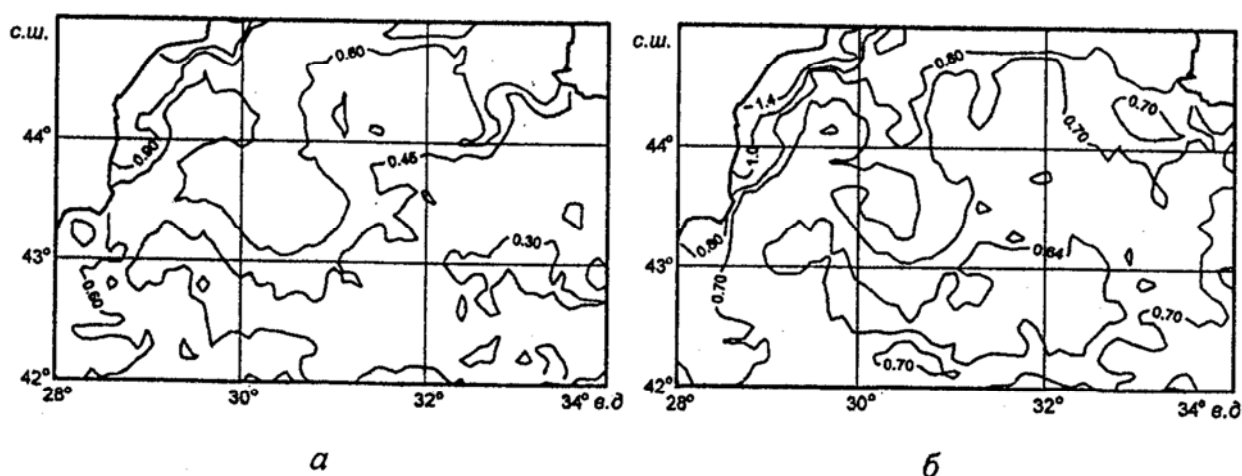
Измеряемые из космоса величины яркости моря в значительной степени подвержены искажениям со стороны атмосферы, поэтому при количественном определении оптико-биологических параметров морской воды через одновременные измерения яркости в нескольких узких участках спектра требуется выполнение специальной атмосферной коррекции. В общем случае задача атмосферной коррекции довольно сложна [5, 6], и на практике для ее решения применяются более или менее упрощенные методики и алгоритмы. Так, например, в стандартной системе обработки данных *SeaWiFS* [7, 8] использованы параметризации ограниченного набора моделей оптических свойств аэрозоля. Эта система создавалась в первую очередь для обработки данных измерений над океаном, и, учитывая описанное в [5] широкое разнообразие проявлений оптических свойств аэрозолей, в общем случае можно ожидать, что результаты ее применения для таких акваторий, как Черное море, будут малонадежными. И практика говорит о том, что часто это действительно так [3, 4].

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы разобраться в причинах и физических механизмах возникновения некоторых явных ошибок при обработке данных *SeaWiFS* с использованием стандартного алгоритма, предложенного в *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*. Ограничимся здесь только таким анализом, который может быть проведен без привлечения контрольных подспутниковых измерений за счет сопоставления совокупности дистанционных данных, полученных в нескольких спектральных участках в различные дни в пределах одного и того же выделенного тестового участка моря с предположительно неизменными оптическими свойствами воды. Используются съемки *SeaWiFS*, выполненные над Черным морем 1, 2 и 4 августа 1998 г. в режиме *Global Area Coverage (GAC)*. Для обработки исходной

© В.С. Суетин, С.Н. Королев, В.В. Суслин, А.А. Кучерявый, 2004

информации, представленной в формате *Level-1a*, применяется программный пакет *SeaWiFS Data Analysis System (SeaDAS)*, созданный в *NASA* специально для реализации стандартной системы обработки данных *SeaWiFS*.

В указанные дни над Черным морем было мало облаков, но аэрозоль имел большую плотность, благодаря чему результаты спутниковых наблюдений предоставляют хорошую возможность для тестирования процедуры атмосферной коррекции. Пример очевидных ошибок учета атмосферных помех по стандартному алгоритму *NASA* для съемки Черного моря 2.08.98 г. в канале 412 нм приведен в [3]. В результате выполнения атмосферной коррекции получаются величины так называемой нормализованной спектральной яркости моря $L_{WN}(\lambda)$ [5]. Здесь λ — длина волны оптического излучения. На рис. 1 показаны схематические карты величин $L_{WN}(555)$ и $I_{510} = L_{WN}(510)/L_{WN}(555)$ в западной части Черного моря 2.08.98 г. Этот рисунок отражает фактическое пространственное распределение данных величин с закруглением многих мелкомасштабных деталей, которые в принципе позволяет проследивать *SeaWiFS*. Напомним, что при съемках в режиме *GAC SeaWiFS* имеет пространственное разрешение ~ 5 км, а в режиме *Local Area Coverage (LAC)* — ~ 1 км. Кроме того, *SeaWiFS* имеет еще три спектральных канала, пригодных для определения оптических свойств морской воды, — 412, 443 и 490 нм, и было бы полезным использовать все информационные возможности этого прибора. Вместе с тем такие примеры, как приведенные в работе [3], говорят о существовании серьезных проблем, в особенности для каналов 412 и 443 нм.



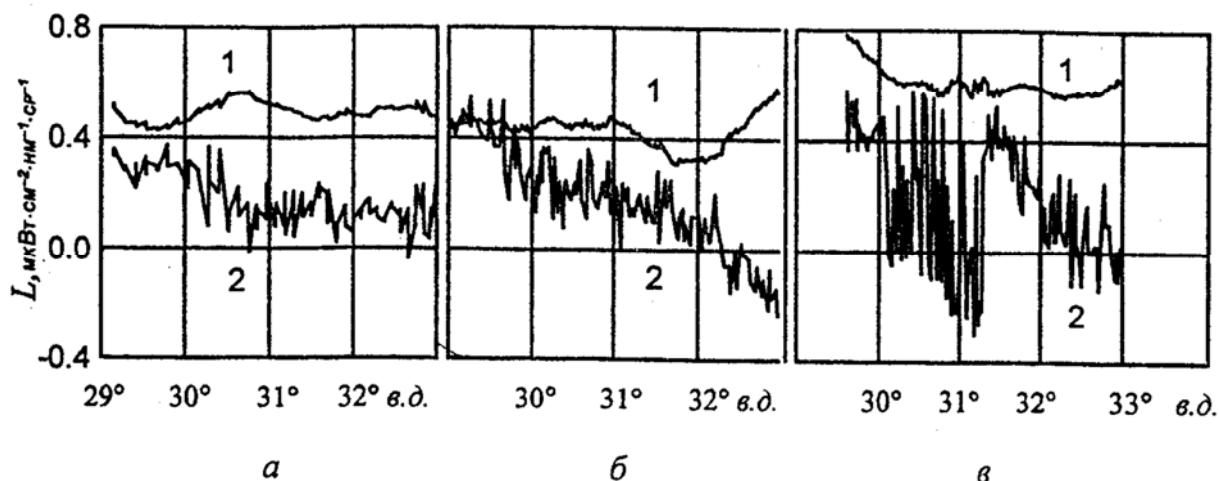
Р и с. 1. Пространственное распределение $L_{WN}(555)$, $\text{мкВт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{нм}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ (а) и I_{510} (б) в западной части Черного моря 2 августа 1998 г. по данным *SeaWiFS*

На картах $L_{WN}(555)$ и I_{510} (рис. 1) наблюдаются протяженные однородные участки в юго-западной части моря. Для более детального анализа были отобраны отсчеты, лежащие внутри узкой полоски с координатами в пределах $42,5\text{--}42,6^\circ\text{с.ш.}$, $29\text{--}33^\circ\text{в.д.}$ (на съемке 4.08.98 г. из-за облачности координаты ограничены участком $29,5\text{--}33^\circ\text{в.д.}$). Вычисленные по сформированным таким способом тестовым наборам данных средние значения $L_{WN}(555)$ для трех рассматриваемых дней лежат в пределах $0,40\text{--}0,41 \text{ мкВт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{нм}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$; соответствующие стандартные отклонения составляют $0,05\text{--}0,07 \text{ мкВт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{нм}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$. Средние значения и стандартные отклонения I_{510} равны соответственно $0,63\text{--}$

0,66 и 0,02–0,03. Эти оценки говорят о пространственной однородности и стабильности полей рассматриваемых величин по времени. Об этом же для значительно более длительного периода свидетельствуют и приведенные в [4] карты $L_{\text{WN}}(555)$ и определенной через I_{510} концентрации хлорофилла a , построенные по данным *SeaWiFS* от 13 и 19 июля и 19 августа 1998 г. Исходя из этих и других аналогичных оценок, можно также предположить, что атмосферная коррекция для этих величин имеет удовлетворительную точность.

Согласно [4], величины $L_{\text{WN}}(555)$ и I_{510} позволяют в первом приближении охарактеризовать оптические свойства воды в море, и если эти две величины почти не меняются, то можно предположить, что $L_{\text{WN}}(\lambda)$ и для других длин волн λ тоже не будут значительно меняться. Однако оказывается, что результаты определения $L_{\text{WN}}(412)$ испытывают существенные изменения как по пространству, так и по времени.

На рис. 2 приведены зависимости $L_{\text{WN}}(412)$ от долготы в пределах выделенных тестовых наборов измерений. На этих графиках наблюдаются лишние физического смысла отрицательные значения и резкие пространственные вариации. Одним из наиболее показательных примеров служит участок около $31,2 - 31,4^\circ$ в.д. на съемке 4.08.98 г., где уровень $L_{\text{WN}}(412)$ меняется в пределах от $-0,3$ до $0,5$ $\text{мкВт}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{нм}^{-1}\cdot\text{ср}^{-1}$. При этом в другие дни $L_{\text{WN}}(412)$ здесь же испытывает лишь относительно слабые флуктуации. Заметим, что наиболее существенные из подобных эффектов не локализируются только лишь в пределах рассматриваемой узкой полоски на карте, но имеют значительную протяженность по широте в форме областей с отчетливыми границами. В качестве примера укажем работу [3], в которой на карте $L_{\text{WN}}(412)$ для 2.08.98 г. большую площадь занимают отрицательные значения.



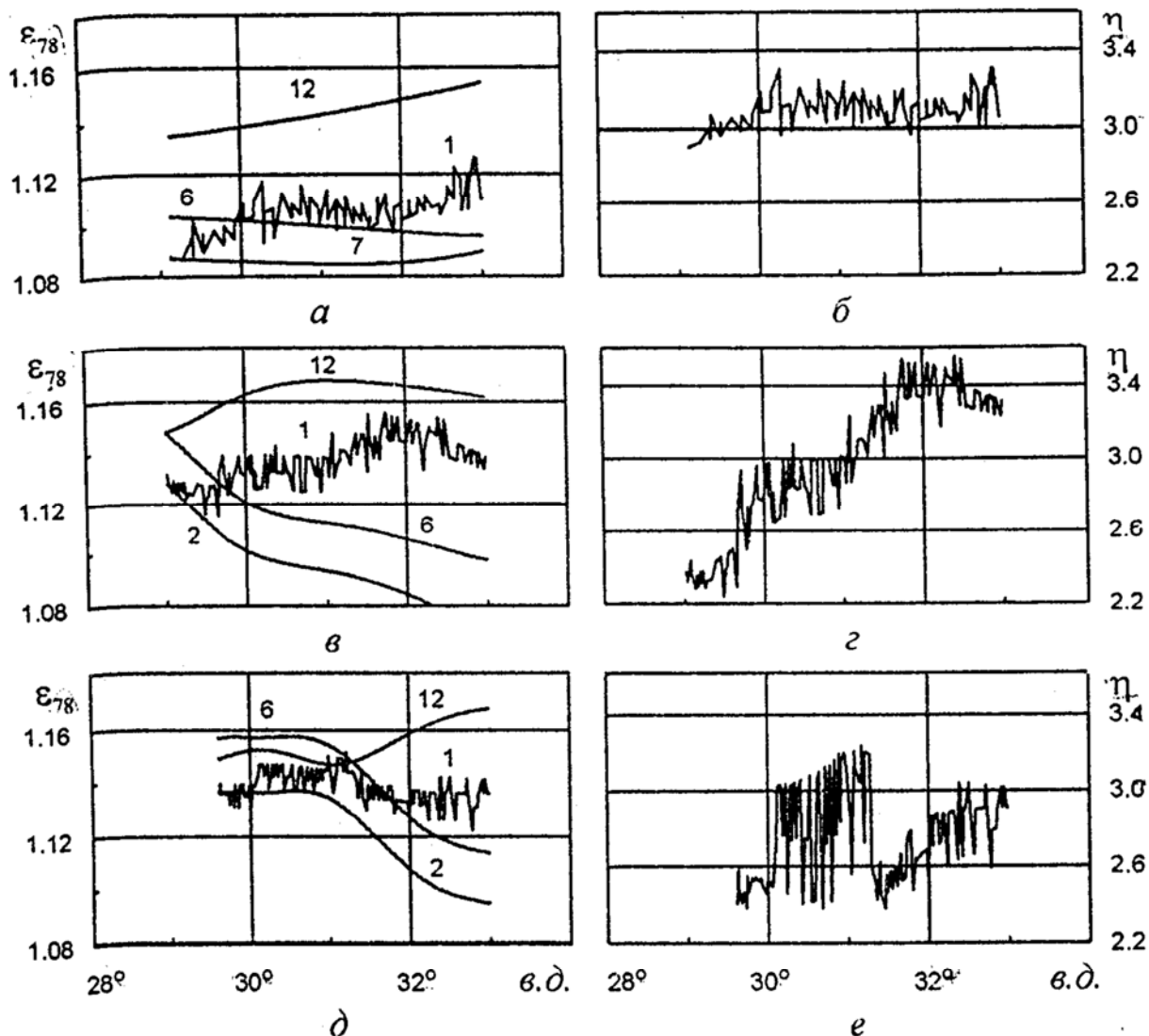
Р и с. 2. Примеры изменений $L_{\text{WN}}(412)$ и $L_{\text{AM}}(865)$ по долготе в выделенных тестовых наборах данных 1.08.98 (а), 2.08.98 (б), 4.08.98 (в): 1 – $L_{\text{AM}}(865)$; 2 – $L_{\text{WN}}(412)$

Ниже основное внимание уделяется измерениям в спектральном участке 412 нм, поскольку для него отмеченные противоречия проявляются в наибольшей степени. Как правило, почти везде через $L_{\text{WN}}(412)$ будут обозначаться не истинные значения этой величины в море, а результаты ее определения по спутниковым данным; что именно подразумевается в каждом конкретном

случае, будет ясно из контекста. Задача определения истинного значения $L_{WM}(412)$ здесь не рассматривается, предполагается лишь, что в пределах выделенного тестового набора данных оно постоянно, а все наблюдаемые вариации этой величины являются следствием (и признаком) несовершенства алгоритма ее определения.

Кроме $L_{WM}(412)$, на рис. 2 показаны графики величины $L_{AM}(865) = [L_i(865) - L_r(865)]/\cos \theta_0$. Здесь θ_0 — зенитный угол Солнца; $L_i(865)$ — измеряемая в космосе яркость системы «море - атмосфера»; $L_r(865)$ — составляющая рэлеевского рассеяния для спектрального канала 865 нм. Как правило, с высокой точностью выполняется условие $L_{WM}(865) = 0$, поэтому $L_{AM}(865)$ характеризует величину аэрозольной составляющей рассеяния света в атмосфере. Приведенные на рис. 2 графики $L_{AM}(865)$ показывают, что кроме крайнего восточного участка для 2.08.98 г. в пределах каждой отдельной съемки эта величина не претерпевает сколько-нибудь значительных изменений по долготе и, значит, аномальная изменчивость $L_{WM}(412)$ не может быть напрямую связана с вариациями $L_{AM}(865)$. Вместе с тем в простейшей схеме аэрозольной коррекции [9] предполагается, что при расчете $L_{WM}(412)$ атмосферная поправка пропорциональна $L_{AM}(865)$ и соответственно ошибки определения этой поправки тоже должны быть пропорциональны величине $L_{AM}(865)$. Однако из анализа рис. 3 видим, что это далеко не так. Заметим, в [9] в качестве базовой длины волны в атмосферной коррекции используется не 865, а 670 нм, но это в данном случае неважно.

Для того чтобы лучше понять причины противоречивых изменений $L_{WM}(412)$, необходимо подробнее рассмотреть детали применяемого в *NASA* алгоритма обработки данных прибора *SeaWiFS* [7]. Для определения и учета аэрозольных эффектов в конкретных условиях в этом алгоритме используются измерения в каналах 765 и 865 нм. По ним определяются величины ϵ_{78} и $L_{AM}(865)$. Физический смысл и способ определения этих величин подробно описан в [7]. Заметим только, что величина $L_{AM}(\lambda)$ введена нами для удобства описания эмпирических данных и в обозначениях из [7] она с точностью до постоянного множителя F_0/π соответствует сумме $(\rho_a + \rho_{ar})$. Обозначение ϵ_{78} принято в описании системы обработки *SeaWiFS* [8]; оно является сокращением от принятого в [7] более общего обозначения $\epsilon(\lambda_7, \lambda_8) = \epsilon(765, 865)$; при этом учитывается, что длинам волн 765 и 865 нм в составе спектральных каналов прибора *SeaWiFS* соответствуют номера 7 и 8. Для определения аэрозольных эффектов, и прежде всего $L_{AM}(\lambda)$, при произвольной длине волны излучения λ через найденные величины ϵ_{78} и $L_{AM}(865)$ используется следующая схема. Имеется заданный набор из 12 атмосферных моделей, и любая реальная ситуация описывается как некоторая формальная математическая комбинация оптических свойств двух таких моделей, для которых эмпирическое значение ϵ_{78} лежит между соответствующими модельными значениями. В отличие от применявшегося ранее алгоритма [9] использование заданного набора атмосферных моделей позволяет точнее учитывать эффекты многократного рассеяния излучения. Для лучшего понимания причин появления противоречивых оценок $L_{WM}(412)$ полезно рассмотреть соотношения между ключевыми параметрами процедуры атмосферной коррекции — ϵ_{78} , $L_{AM}(865)$ и $L_{AM}(412)$.



Р и с. 3. Примеры изменений параметров ϵ_{78} и η по долготе в выделенных тестовых наборах данных 1.08.98 (а, б), 2.08.98 (в, г), 4.08.98 (д, е): 1 – эмпирические оценки ϵ_{78} ; 2, 6, 7 и 12 – результаты модельных расчетов по соответствующим моделям

В общем случае интерпретация наблюдаемых вариаций $L_{\text{ин}}(412)$ затруднена сложной и многообразной изменчивостью различных факторов, однако если не обращать внимания на второстепенные детали, то в данном тестовом массиве удастся выделить небольшое число наиболее важных эффектов.

Так как $L_{\text{АН}}(865)$ почти не меняется, то вместо отдельного анализа $L_{\text{АН}}(865)$ и $L_{\text{АН}}(412)$ удобнее рассмотреть их отношение: $\eta = L_{\text{АН}}(412)/L_{\text{АН}}(865)$. По аналогии с принятым в работе [7] обозначением для ϵ (λ_i, λ_j) с индексами i и j , пробегающими значения от 1 до 8, величину η можно обозначить как $\eta(\lambda_1, \lambda_8) = \eta(412, 865)$. Величины ϵ и η имеют близкий физический смысл, описывая спектральную зависимость эффектов рассеяния света аэрозолем; при этом ϵ (и в частности ϵ_{78}) характеризует эти эффекты в приближении однократного рассеяния, тогда как η дает более полное представление о реальных процессах в атмосфере. Вообще говоря, величина η зависит от многих факторов, в том числе и от уровня $L_{\text{АН}}(865)$, но в данных условиях она оказывается достаточно удобной характеристикой функционирования алгоритма атмосферной коррекции.

На рис. 3 показаны изменения по долготе вычисленных через спутниковые данные величин ϵ_{78} и η вместе с соответствующими модельными значениями ϵ_{78} (характеристики моделей аэрозоля приведены в табл. 1 согласно [10]). Так же, как и при обработке данных *SeaWiFS* по стандартному алгоритму, для модельных расчетов применен пакет *SeaDAS*, в котором, кроме автоматического режима обработки спутниковых данных с поиском ϵ_{78} по фактическим измерениям, предусмотрена еще и возможность выполнения расчетов для любой из имеющихся 12 моделей с выдачей почти всех промежуточных параметров. Следует заметить, что при расчетах по фиксированной модели значение ϵ_{78} уже не определяется по фактическим измерениям, однако по-прежнему делается согласование результатов расчетов с эмпирической величиной $L_{AM}(865)$, т. е. в этом случае вместо двух степеней свободы в алгоритме учитывается только одна.

Т а б л и ц а 1

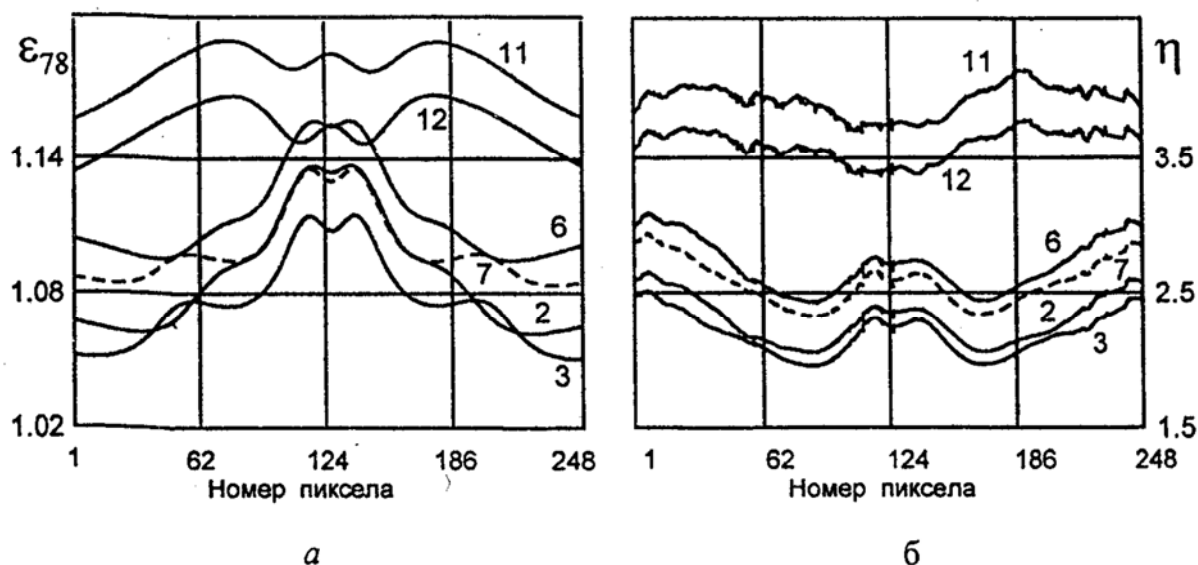
**Характеристики нескольких аэрозольных моделей
из применяемой в NASA системы обработки данных *SeaWiFS***

Номер модели	Наименование	Относительная влажность, %
2	Морская	50
6	Прибрежная	50
7	Прибрежная	70
12	Тропосферная	99

Наиболее важными особенностями показанных на рис. 3 графиков являются их взаимные пересечения, причем есть случаи пересечений как эмпирических оценок ϵ_{78} с модельными, так и двух модельных кривых между собой. Это приводит к тому, что в разных участках моря (или в разные дни на одном и том же участке) найденное по фактическим измерениям эмпирическое значение ϵ_{78} может попадать в промежуток между модельными ϵ_{78} , соответствующими разным парам моделей. Это означает, что в алгоритме атмосферной коррекции на разных участках используются разные сочетания моделей.

Как ϵ_{78} , так и η испытывают на первый взгляд хаотичные флуктуации, и отчасти между ними прослеживается корреляция, обусловленная близким физическим смыслом этих величин. Однако относительные изменения η оказываются существенно более сильными и, кроме этого, в отдельных случаях они резкие и скачкообразные. В качестве примеров можно указать участки около 31,3° в.д. для 4.08.98 г. и около 29,7° в.д. для 2.08.98 г. При сопоставлении приведенных на рис. 3 графиков для величин η с показанными на рис. 2 графиками $L_{WM}(412)$ можно обнаружить почти очевидное проявление отрицательной корреляции между ними, особенно по данным от 4.08.98 г. В резуль-

тате этого вариации η почти непосредственно отражаются в $L_{WN}(412)$. Этот эффект имеет вполне логичный физический смысл: при определении $L_{WN}(412)$ величина $L_{AM}(412)$ вычитается из измеряемой в космосе полной яркости $L(412)$. Наконец, при внимательном анализе приведенных на рис. 3 графиков можно увидеть, что на величину η оказывают заметное влияние изменения (переключения в алгоритме) сочетаний моделей, используемых в процедуре атмосферной коррекции.



Р и с. 4. Зависимости параметров ε_{78} и η от номера пиксела в строке сканирования прибора *SeaWiFS* для ряда фиксированных аэрозольных моделей (цифры у кривых – номера моделей)

Глубже понять перечисленные эффекты позволяют показанные на рис. 4 соотношения между величинами ε_{78} и η , вычисленными по различным фиксированным аэрозольным моделям. Здесь эти величины показаны как функции от номера пиксела в строке сканирования *SeaWiFS* в режиме *GAC*. Для построения этого рисунка к отобранным ранее отсчетам были добавлены точки, выходящие по долготе за пределы описанного выше тестового участка, но при этом удовлетворялось такое же ограничение по широте – от 42,5 до 42,6°с.ш. На интервалах с номерами пикселей от 1 до 150 и от 150 до 248 использованы соответственно данные съемок 1.08.98 г. и 2.08.98 г. Для определения соответствия между рис. 3 и 4 в табл. 2 приведены номера пикселей, имеющих наименьшую и наибольшую долготу на рис. 3. В результате наклона орбиты спутника строки сканирования располагаются на карте под некоторым углом к выделенной таким образом полоске, поэтому в нее попадают отсчеты из разных строк; но так как рассматриваемая полоска является достаточно узкой, существенного нарушения однозначного соответствия между номером пиксела в строке и географической долготой не происходит.

**Соответствие между номерами пикселей на рис. 4
и долготой краевых точек для выделенных тестовых участков**

Восточная дол- гота, град	1.08.98 г.	2.08.98 г.	4.08.98 г.
29,0	4	148	—
29,5	—	—	119
33,0	40	204	173

На рис. 4 показано, что при изменении номера пикселя происходят изменения угла сканирования и таких углов, как высота и азимут Солнца, поэтому основной смысл этого рисунка состоит в отображении угловых эффектов. Величины ϵ_{78} и η , вычисленные по заданным моделям аэрозоля, меняются прежде всего в связи с изменениями угловых условий наблюдения. Характерно, что кривые ϵ_{78} имеют гладкую и регулярную форму, почти симметричную относительно подспутниковой точки, а кривые η испытывают некоторые искажения, обусловленные, по-видимому, сложными эффектами многократного рассеяния. Наиболее интересная особенность представленных на рис. 4 графиков состоит в том, что несмотря на пересечение двух модельных кривых ϵ_{78} (для моделей 6 и 12) соответствующие этим моделям графики η не пересекаются.

Подробные числовые оценки основных параметров в окрестности точки пересечения двух модельных кривых приведены в табл. 3. Они получены по данным от 4.08.98 г. на двух прилегающих строках сканирования *SeaWiFS* (при съемке в режиме *GAC*) для одного и того же номера пикселя — 146. Соответствующие точки имеют географические координаты: 31,279°в.д., 42,543°с.ш. и 31,293°в.д., 42,582°с.ш. В табл. 3 отсчеты в этих двух точках обозначены через т.1 и т.2 соответственно. Приведенные на рис. 4 и в табл. 3 числовые оценки отчетливо демонстрируют проявления отличий в моделях 6 и 12. Строго говоря, значения $L_{\text{WN}}(\lambda)$ в табл. 3 соответствуют несколько умозрительным ситуациям, поскольку реальное значение ϵ_{78} ($\approx 1,144$) для рассматриваемых точек не совпадает ни с одной из моделей. Для модели 6 в этих точках $\epsilon_{78} = 1,1481$ и $1,1480$; для модели 12 $\epsilon_{78} = 1,1481$. Фактически эти числа совпадают, но формальное отличие в 0,0001 для модели 6 приводит к тому, что по разные стороны от точки пересечения модельных кривых в алгоритме атмосферной коррекции используются разные сочетания моделей — {2, 12} слева и {2, 6} справа от нее, что и приводит к появлению резкого отличия получаемых в результате применения этого алгоритма значений $L_{\text{WN}}(\lambda)$ для двух рассматриваемых точек: от $-0,215$ до $0,341$ мкВт·см⁻²·нм⁻¹·ср⁻¹ для $\lambda = 412$ и от $0,348$ до $0,462$ мкВт·см⁻²·нм⁻¹·ср⁻¹ для $\lambda = 555$ нм. Необходимо еще иметь в виду, что применяемый в *NASA* алгоритм подразумевает изменения

относительного вклада каждой из двух моделей, которые участвуют в расчетах, в итоговые величины η и $L_{\text{ММ}}(\lambda)$ – в зависимости от соотношения между фактическим и двумя модельными значениями ϵ_{78} . Кроме того, эмпирические величины ϵ_{78} испытывают заметные флуктуации, что может вносить дополнительные трудности в интерпретацию всех реальных ситуаций. Для того чтобы избежать громоздких рассуждений, не будем вникать в эти аспекты задачи, тем более что на приведенных на рис. 3 графиках можно увидеть ряд случаев, в которых эмпирические значения ϵ_{78} почти строго совпадают с модельными кривыми, в том числе для моделей 6 и 12. Две такие точки имеются как раз по разные стороны от рассматриваемой точки пересечения модельных кривых для этих двух моделей. В этих точках фактически реализуются представленные в табл. 3 расчеты, соответствующие экстремальному различию между значениями $L_{\text{ММ}}(\lambda)$, вычисленными по фиксированным моделям.

Т а б л и ц а 3

Проявления неоднозначности в алгоритме атмосферной коррекции вблизи точки пересечения кривых ϵ_{78} для моделей 6 и 12

Модели	η мкВт·см ⁻² ·нм ⁻¹ ·ср ⁻¹		$L_{\text{ММ}}(412)$ мкВт·см ⁻² ·нм ⁻¹ ·ср ⁻¹		$L_{\text{ММ}}(555)$ мкВт·см ⁻² ·нм ⁻¹ ·ср ⁻¹	
	т.1	т.2	т.1	т.2	т.1	т.2
12	3,408	3,408	-0,461	-0,517	0,265	0,220
6	2,645	2,644	0,312	0,268	0,467	0,427
Алгоритм	3,188	2,581	-0,215	0,341	0,348	0,462

Таким образом, представленного материала достаточно для того, чтобы понять основные механизмы, приводящие к наблюдаемым эффектам, — изменения используемых в алгоритме сочетаний аэрозольных моделей в результате пересечений различных кривых ϵ_{78} , а также неадекватные соотношения между величинами ϵ_{78} и η , определяемыми по различным моделям. Наиболее остро эта неадекватность проявляется в точке пересечения кривых ϵ_{78} для моделей 6 и 12, в результате чего применяемый в NASA алгоритм может приводить к эффектам неоднозначности в расчетах $L_{\text{ММ}}(\lambda)$. Заметим, что это почти никак не связано с региональной спецификой оптических свойств аэрозоля над Черным морем, поскольку предопределено свойствами этих двух моделей – при одинаковых ϵ_{78} они дают существенно разные значения η . Актуальность данного эффекта обусловлена только лишь тем, что по наблюдениям над Черным морем получаются близкие к критическому (равному 1,148) значения ϵ_{78} .

Еще одно интересное проявление неустойчивости наблюдается на участке около $30 - 31^\circ$ в.д. для съемки 4.08.98 г. (см. рис. 3). Здесь графики ϵ_{78} для моделей 2 и 12 хотя и не пересекаются, но проходят довольно близко, а эмпирическая величина ϵ_{78} попадает как раз в промежуток между ними и в некоторых точках в результате флуктуаций совпадает с одной из моделей. Для моделей 2 и 12 различие в величине η еще больше, чем для моделей 6 и 12 (см. рис. 4), и поэтому относительно небольшие флуктуации эмпирического ϵ_{78} приводят к очень сильным изменениям $L_{WN}(\lambda)$ (рис. 3). Очевидно, что здесь уже важную роль играет отличие реального аэрозоля над Черным морем от используемых в алгоритмах NASA атмосферных моделей. Не столь очевидным, но не менее существенным образом неадекватность этих моделей проявляется для всех трех рассматриваемых съемок в пересечении эмпирических и модельных ϵ_{78} . Для съемки 1.08.98 г. при этом используемое в алгоритме атмосферной коррекции сочетание моделей {6, 7} меняется на {6, 12}, для съемок 2 и 4.08.98 г. сочетание {2, 6} меняется на {6, 12}. Во всех подобных случаях, хотя и не столь резко, как в описанном выше примере, происходят изменения уровней η и $L_{WN}(412)$.

По данным из табл. 3 можно увидеть, что для $\lambda = 555$ нм рассматриваемые эффекты существенно слабее, чем для 412 нм. Такое проявление специфических свойств аэрозоля может быть связано с особенностями поглощения света аэрозольными частицами [5, 6]. При построении схематических карт, подобных показанным на рис. 1, резкие пространственные изменения L_{WN} сглаживаются, однако в случае необходимости анализа измерений с высоким пространственным разрешением скачкообразные различия между индивидуальными отсчетами в соседних точках могут играть существенную роль. Кроме того, в некоторых ситуациях ошибки определения L_{WN} могут проявляться в виде плавных трендов, которые не так легко выявляются, как при резких пространственных скачках.

Таким образом, используемый в NASA алгоритм атмосферной коррекции в определенных условиях может приводить к ошибочным результатам. Конкретные причины ошибок могут быть обусловлены как отличием оптических свойств аэрозоля над Черным морем от реализованных в алгоритме атмосферных моделей, так и присущей некоторым из этих моделей неоднозначностью соотношения между ключевыми параметрами ϵ_{78} и η .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. McClain C.R., Cleave M.L., Feldman G.C. et al. Science quality SeaWiFS data for global biosphere research // *Sea Technol.* – 1998. – 39. – P. 10–16.
2. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Незлин Н.П. и др. Антициклонические вихри над северо-западным материковым склоном Черного моря и их роль в переносе богатых хлорофиллом шельфовых вод в глубоководный бассейн // *Исследования Земли из космоса.* – 2000. – №3. – С. 71–81.
3. Суевин В.С., Суслин В.В., Кучерявый А.А. и др. Особенности интерпретации данных дистанционных оптических наблюдений Черного моря с помощью прибора SeaWiFS // *Морской гидрофизический журнал.* – 2001. – № 2. – С. 71–80.

4. 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.
5. Gordon H.R. Atmospheric correction of ocean color imagery in the Earth Observing System era // J. Geophys. Res. – 1997. – 102, № D14. – P. 17081 – 17106.
6. Gordon H. R., Du T., Zhang T. Remote sensing of ocean color and aerosol properties: resolving the issue of aerosol absorption // Appl. Opt. – 1997. – 36, № 33. – P. 8670 – 8684.
7. Gordon H.R., Wang M. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm // Ibid. – 1994. – 33, № 3. – P. 443 – 452.
8. Darzi M. SeaWiFS Science Algorithm Flow Chart. – NASA/CR – 1998-206848. – NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland. – 1998. – 36 p.
9. Gordon H.R., Clark D.K., Brown J.W. et al. Phytoplankton pigment concentration in the Middle Atlantic Bight: comparison of ship determination and CZCS estimates // Appl. Opt. – 1983. – 22, № 1. – P. 20 – 36.
10. McClain C R., Barnes R.A., Eplee R.E. et al. SeaWiFS postlaunch calibration and validation analyses. Part 2. – NASA/TM – 2000-206892. – 10. – 2000. – 57 p.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил в
редакцию 04.07.02

ABSTRACT Problem of quantitative determining the seawater optical characteristics using satellite measurements is considered. Main physical mechanisms causing the errors in the result of atmospheric correction based on application of standard *NASA* algorithm are revealed. Disparity between the models of atmospheric aerosol realized in this algorithm and its actual properties above the Black Sea is shown.