

УДК 551.46.08

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

Уточненная интерпретация данных наблюдений Черного моря спутниковым прибором *SeaWiFS* осенью 1998 года

На примере анализа серии наблюдений Черного моря из космоса осенью 1998 г. установлено, что в отдельных случаях атмосферные искажения проявляются для всех измерительных каналов прибора *SeaWiFS* и приводят к существенным ошибкам определения концентрации хлорофилла по стандартному алгоритму *NASA*. После выполнения дополнительной отбраковки данных с отрицательными значениями спектральной яркости поверхности моря для длины волны 412 нм результаты определения содержания хлорофилла находятся в согласии с опубликованными ранее данными прямых измерений. Приводится подробное обсуждение особенностей работы применяемого в *NASA* алгоритма атмосферной коррекции, играющих важную роль при интерпретации данных наблюдений Черного моря.

Работающие в космосе оптические приборы такого типа, как *SeaWiFS* (*Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor*), обеспечивают получение больших массивов данных глобальных наблюдений, по которым с помощью специальных алгоритмов выполняются расчеты содержания хлорофилла в океане, числовых значений оптических параметров воды и атмосферы, определяется их изменчивость на различных масштабах по времени и пространству. Вместе с тем при использовании таких данных требуется определенная осторожность, поскольку из-за трудно учитываемых атмосферных помех и сложного многофакторного характера изменчивости оптических свойств морской воды во многих случаях получаемые результаты содержат существенные погрешности [1 – 7]. Типичным примером служит явное противоречие между описанными в работе [8] спутниковыми наблюдениями глубоководной части Черного моря осенью 1998 г. и представленными в [9] данными прямого определения концентрации хлорофилла *a*. Подобные расхождения могут быть особенно важными, если задача состоит в изучении долговременных процессов на большой площади в море.

Целью настоящей работы является выяснение возможности обнаружения и исключения ошибочных результатов спутниковых наблюдений по формальным признакам с учетом конкретных причин возникновения искажений. Кроме того, интересно дополнить полученные ранее оценки изменений оптических параметров воды летом 1998 г. [1] проверенными данными для осеннего сезона.

Эксплуатация прибора *SeaWiFS* в космосе в значительной мере имеет опытно-экспериментальный характер, поэтому многие элементы системы обработки информации от задания калибровочных параметров, выбора состав

© В.С. Суетин, С.Н. Королев, В.В. Суслин, А.А. Кучерявый, 2008

вычисляемых величин и до разнообразных деталей в алгоритмах, по которым производятся преобразования результатов космических измерений, подвержены многочисленным уточнениям и модернизациям.

Основные описанные ниже результаты получены с использованием хранящихся в архиве *NASA* стандартных продуктов обработки так называемого второго уровня (формат *Level-2*), подготовленных при очередном полном обновлении этих данных во второй половине 2005 г. Для дополнительного анализа выполняются расчеты по специализированной программе *SeaDAS* (*SeaWiFS Data Analysis System*, версия 4.8) [10].

Один из ключевых этапов обработки результатов спутниковых измерений заключается в определении нормализованной спектральной яркости водной поверхности $L_{WN}(\lambda)$ (λ – средние длины волн спектральных интервалов видимого диапазона). Величины $L_{WN}(\lambda)$ вычисляются по специальным алгоритмам атмосферной коррекции с использованием модельных представлений оптических свойств аэрозолей. В силу широкого разнообразия изменчивости условий в атмосфере над Черным морем реальный аэрозоль далеко не всегда «подчиняется» тем предположениям, которые заложены в этих моделях.

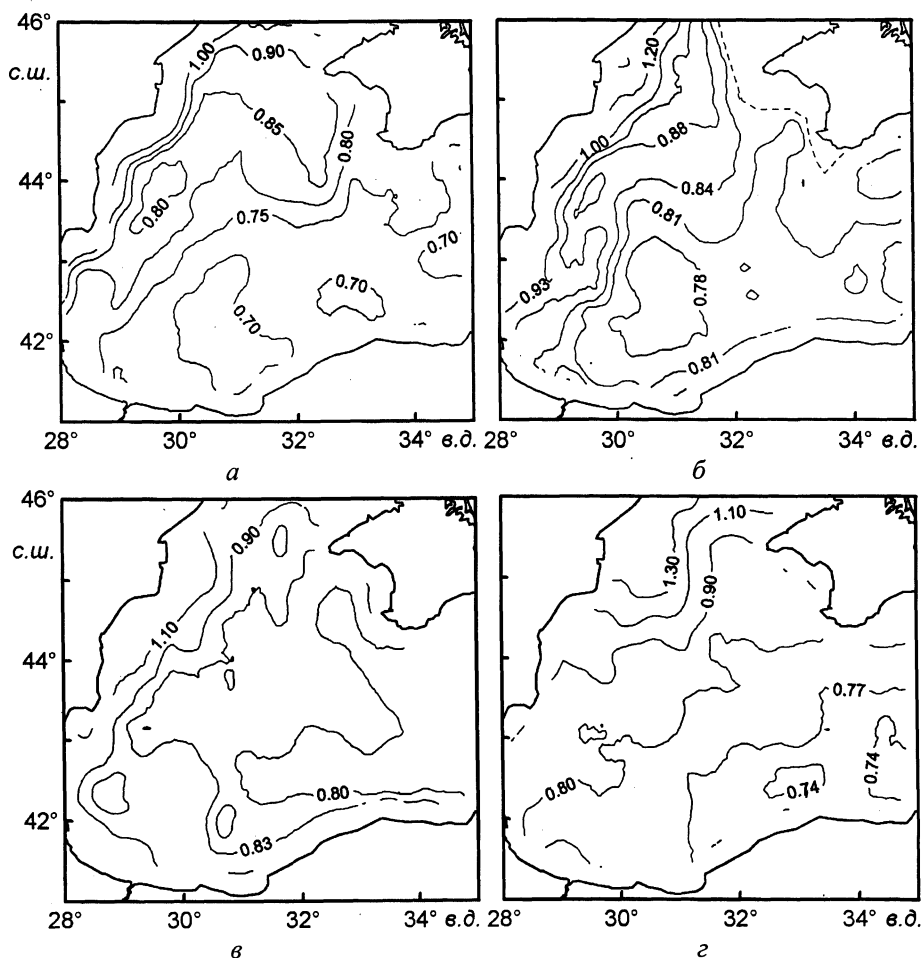
Возникающие из-за этого ошибки в определении $L_{WN}(\lambda)$ различным образом проявляются для разных λ . Накопленный опыт анализа данных *SeaWiFS* говорит о том, что основная тенденция состоит в получении сильно заниженных (а иногда и отрицательных) значений $L_{WN}(\lambda)$ для отдельных спектральных каналов (чаще всего – для $\lambda = 412$ нм); в ряде случаев наблюдается также нереальная резкая пространственно-временная изменчивость результатов определения $L_{WN}(\lambda)$ [1 – 4]. При этом проявления атмосферных искажений с увеличением λ существенно ослабевают, и если использовать только такие измерения, для которых $L_{WN}(412) > 0$, и по ним вычислять спектральные отношения $I_{490} = L_{WN}(555)/L_{WN}(490)$ или $I_{510} = L_{WN}(555)/L_{WN}(510)$, то, как правило, получаются достаточно надежные результаты.

На рис. 1 приведены карты пространственного распределения I_{510} в западной части Черного моря, полученные при выполнении таких условий для сентября, октября и ноября 1998 г. Из-за помех со стороны облачности показанные на рис. 1 карты сформированы по данным съемок на нескольких витках спутника при пролете над Черным морем в соседние дни.

Наиболее высокие значения I_{510} (примерно до 1,1 – 1,3) наблюдаются в узкой полосе вдоль северо-западного побережья моря, минимальные (в пределах 0,7 – 0,8) – на большой площади в глубоководной части моря. В интервале изменений I_{510} примерно от 0,75 до 0,90 более или менее отчетливо прослеживается имеющая сложную пространственную структуру граница между глубоководной частью моря и шельфовой зоной с различными оптическими свойствами воды. С течением времени расположение и конфигурация этой границы претерпевают значительные изменения, отражая особенности процессов перемешивания вод, развития фитопланктона и т.п.

Величина I_{510} интересна тем, что зависит в первую очередь от поглощения света в воде и может быть использована для вычисления концентрации хлорофилла [1, 4, 11]. Будем обозначать через C_a результаты вычисления

концентрации хлорофилла a в море по операционному алгоритму $OC4v4$, хранящиеся в архиве данных $NASA$ или получающиеся при расчетах по программе $SeaDAS$. В этом алгоритме используются различные величины I_λ , выбираемые в зависимости от их уровня [12], однако для рассматриваемых нами ситуаций, если ограничиться интервалом $I_{510} < 1$, в расчетах учитываются только I_{510} или I_{490} , и, кроме того, между любыми двумя из трех величин I_{490} , I_{510} и C_a с хорошей точностью выполняются однозначные связи. Например, непосредственным образом получается следующая упрощенная аппроксимация: $C_a = 2,75 (I_{510})^{3,85}$. С помощью этого соотношения устанавливается соответствие между показанными на рис. 1 уровнями I_{510} и величиной C_a .



Р и с. 1. Пространственное распределение величины I_{510} в западной части Черного моря: *а* – 17.09.1998 г.; *б* – 1 – 2.10.1998 г.; *в* – 18 – 20.10.1998 г.; *г* – 3 – 5.11.1998 г. (штриховой линией выделен участок, закрытый облачностью)

Особенности изменений величин I_λ и C_a с течением времени иллюстрируются статистическими оценками, приведенными в табл. 1. В ней содержатся данные, относящиеся к площади прямоугольного участка, ограниченного такими координатами: 30,3 – 31° в.д. и 42,5 – 43° с.ш. Этот участок

расположен в глубоководной части моря и совпадает с рассмотренным ранее в работе [1]. Для различных дней съемок в зависимости от угла сканирования количество отсчетов, по которым делалось осреднение, лежит в пределах от 94 до 142 (при использовании данных формата *GAC* – *Global Area Coverage*). Рассматриваемый участок оказался удобным для анализа тем, что в течение осени 1998 г. он достаточно часто был полностью свободен от облачности. Средний уровень I_{510} на этом участке плавно увеличивается примерно от 0,7 в сентябре до 0,82 к концу октября, что соответствует изменениям C_a от $\approx 0,69$ до $1,3 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ (см. табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Средние значения и средние квадратичные отклонения (в скобках) ряда величин в пределах выделенного участка в открытом море

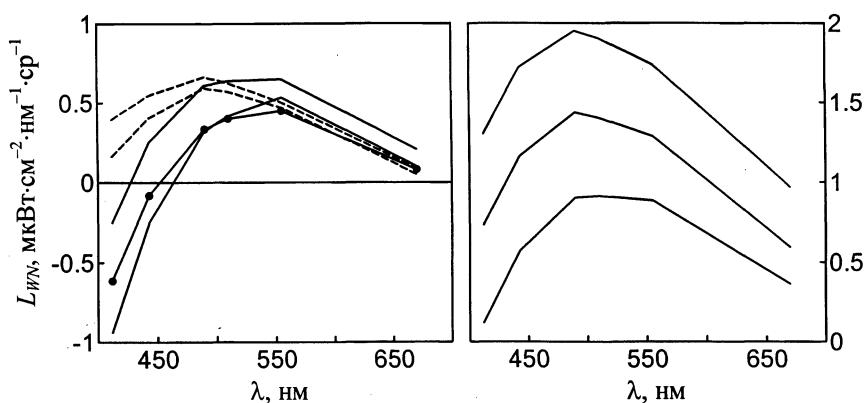
1998 г.	$C_a, \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$	I_{510}	I_{490}	$L_{WN}(412), \text{ мкВт}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{нм}^{-1}\cdot\text{ср}^{-1}$
17.09	0,690 (0,058)	0,694 (0,024)	0,603 (0,022)	0,22 (0,05)
02.10	0,913 (0,088)	0,762 (0,025)	0,678 (0,026)	0,42 (0,08)
20.10	1,290 (0,151)	0,819 (0,025)	0,774 (0,033)	0,39 (0,10)
03.11	1,179 (0,094)	0,795 (0,018)	0,749 (0,022)	0,48 (0,08)
20.10	1,36	0,823	0,791	0,161
20.10	1,21	0,803	0,756	0,394

Пр и м е ч а н и е. В двух последних строчках – примеры для единичных отсчетов.

Кроме оценок I_{510} и C_a в табл. 1 приведены еще и статистические данные для $L_{WN}(412)$. По ним можно удостовериться в том, что осреднённые по рассматриваемому участку значения $L_{WN}(412)$ были не только больше нуля, но и превышали $0,2 \text{ мкВт}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{нм}^{-1}\cdot\text{ср}^{-1}$. Заметим, что именно такое пороговое значение для $L_{WN}(412)$ было использовано при отбраковке искаженных данных в [2, 13]. Поэтому, следуя схеме рассуждений из работы [2], можно считать, что результаты определения I_λ для $\lambda = 490$ и 510 нм, а значит, и рассчитанные значения C_a не содержат существенных атмосферных искажений. Об этом же свидетельствуют достаточно низкие значения средних квадратичных отклонений величин I_{490} , I_{510} и C_a (см. табл. 1). В то же время средние квадратичные отклонения $L_{WN}(412)$ составляют 20 – 25 % от средних значений, что говорит о неустойчивости результатов расчетов этой величины. На рис. 2 штриховыми линиями показаны два типичных спектра $L_{WN}(\lambda)$, отражающие характерный разброс в результатах их определения по спутниковым данным. Соответствующие значения I_{490} , I_{510} и $L_{WN}(412)$ приведены в двух последних строчках табл. 1. Эти спектры имеют вполне логичную форму, заключающуюся в близости к нулю $L_{WN}(670)$ и достижении максимума $L_{WN}(\lambda)$ при $\lambda = 490$ нм.

Аналогичные результаты часто получаются при анализе данных наблюдений Черного моря, и хотя они мало пригодны для определения всех основных составляющих морской воды с применением комплексных многопараметрических методик, требующих точного знания $L_{WN}(\lambda)$ для всех λ (см., например, [13, 14]), но все же в представленных здесь примерах атмосферные

искажения достаточно слабо сказываются на результатах определения C_a по стандартному алгоритму NASA (см. табл. 1). В этом смысле приведенные примеры демонстрируют существование осенью 1998 г. более или менее благоприятных условий хотя бы в отдельные периоды времени.



Р и с. 2. Примеры результатов определения спектральной зависимости $L_{WN}(\lambda)$ для нескольких отсчетов в пределах рассматриваемого тестового участка по данным от 10 и 20 октября 1998 г. (соответственно сплошные и штриховые линии; линия с точками – спектр с нулевыми значениями флагов № 16 и 20)

Показанные на рис. 1 карты вместе с аналогичными картами для других оптических параметров позволяют заключить, что данные из табл. 1 соответствуют значительной площади достаточно однородной по своим свойствам области открытого моря. Заметим, что по данным съемок в те же дни, которые отражены на рис. 1 и в табл. 1 (или соседние с ними), в восточной глубоководной части моря получают примерно такие же уровни C_a .

Поэтому оценки концентрации хлорофилла, приведенные в табл. 1 и в статье [8], могут быть сопоставлены с результатами прямого определения хлорофилла по взятым в море пробам, которые описаны в [9]. В работе [8] приведены оценки концентрации хлорофилла по спутниковым измерениям, относящиеся ко всей глубоководной части моря (с глубинами больше 1500 м) и сгруппированные по 8-дневным интервалам времени. Используемые в [9] пробы воды отбирались в центре западной глубоководной части моря примерно в том же месте, где расположен участок, рассмотренный при составлении табл. 1.

Напомним, что в [9] приведены следующие оценки суммарной концентрации хлорофилла a и феофитина: $C_{a+\phi} = 0,62 \pm 0,24 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ в сентябре и $1,21 \pm 0,23 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ в октябре – декабре 1998 г. Если принять во внимание, что в среднем на феофитин приходится около 20% от $C_{a+\phi}$, то соответственно концентрация хлорофилла a окажется несколько ниже, чем приведенные нами в табл. 1 результаты расчетов C_a по спутниковым измерениям. Однако этот эффект, который аналогичен тенденции, отмеченной в [1] для летнего сезона (обусловленной повышенным содержанием желтого вещества в водах Черного моря), укладывается в пределы указанного в [9] разброса. В то же время

результаты, описанные в [8], отличаются от данных из [9] намного сильнее; например, для октября 1998 г. в [8] получено $C_{a+\phi} \approx 2 - 3 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$. Выполненный ниже анализ говорит о том, что наиболее вероятной причиной этого противоречия является плохой учет атмосферных эффектов в том массиве данных *SeaWiFS*, который был использован в [8].

В качестве примера рассмотрим спутниковые наблюдения западной части Черного моря 10 октября 1998 г. На рис. 2 показаны результаты определения спектров $L_{WN}(\lambda)$ для нескольких точек из того же участка, по которому получена табл. 1. Более того, важно подчеркнуть, что эти примеры выбраны так, что соответствующие отсчеты сосредоточены в пределах еще меньшей площади моря ($30,327 - 30,594^\circ\text{в.д.}; 42,834 - 42,966^\circ\text{с.ш.}$) и, по существу, относятся к примыкающим друг к другу пикселям на съемке формата *GAC*. Дополнительная информация к рис. 2 содержится в табл. 2.

Таблица 2

Числовые характеристики к показанным на рис. 2 спектрам для 10 октября 1998 г.

$L_{WN}(\lambda), \text{мкВт}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{нм}^{-1}\cdot\text{ср}^{-1}$		$C_a, \text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$	I_{510}	Флаг № 16	Флаг № 20
$\lambda = 412 \text{ нм}$	$\lambda = 670 \text{ нм}$				
-0,942	0,100	-	1,28	1	1
-0,615	0,080	3,91	1,12	0	0
0,117	0,363	2,44	0,97	0	1
1,302	0,969	1,92	0,91	0	1

Прежде всего бросается в глаза неожиданно сильное различие между всеми показанными на рис. 2 спектрами. В двух случаях $L_{WN}(412)$ имеет большое по модулю отрицательное значение, тогда как у всех других получился аномально высокий уровень $L_{WN}(670)$. При этом легко увидеть, что спектры для 10 и 20 октября имеют существенно различную форму. Заметим, что приведенные примеры не являются редкими исключениями и достаточно полным образом отражают все разнообразие спектров $L_{WN}(\lambda)$, относящихся к рассматриваемому участку и его окрестности. По результатам съемки 10 октября во всем этом районе моря совсем нет таких спектров, для которых одновременно выполняются физически осмысленные условия $L_{WN}(412) > 0$ и $L_{WN}(670) \approx 0$. По данным из табл. 2 I_{510} превышает 0,9 и достигает $\approx 1,3$, т.е. в этот день в открытом море эта величина I_{510} сравнима с тем максимальным уровнем, который в другие дни отмечается в шельфовой зоне (см. рис. 1). Соответствующие оценки C_a лежат в интервале $\approx 1,9 - 3,9 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$.

Для одного из приведенных в табл. 2 примеров значение C_a в выходном файле стандартных продуктов обработки данных *SeaWiFS* отсутствует, поскольку соответствующие величины $L_{WN}(\lambda)$ не удовлетворяют определенным условиям, заложенным в операционном алгоритме *NASA*. В системе обработки данных *SeaWiFS*, кроме собственно операции вычисления параметров моря и атмосферы, предусмотрено еще и выполнение контрольной проверки достоверности получаемых результатов по серии простых внутренних признаков [3, 15]. Итоги этих проверок отражаются в специаль-

ных величинах, называемых флагами. Нулевое значение того или иного флага означает благополучный исход соответствующей проверки; флаг «включается» (т.е. его значение становится равным единице), если обнаруживается нарушение какого-либо контрольного условия. В данном примере значение «1» присвоено флагу № 16, указывающему на то, что спектр $L_{WN}(\lambda)$ имеет аномальную форму. Здесь это получилось потому, что в одной из контрольных проверок нарушено требование, чтобы величина $L_{WN}(443)$ была больше порогового уровня, заданного равным $-0,187 \text{ мкВт}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{нм}^{-1}\cdot\text{ср}^{-1}$. При формальном расчете концентрации хлорофилла a по алгоритму OC4v4 через I_{510} в этом случае получилось $C_a \approx 6 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$.

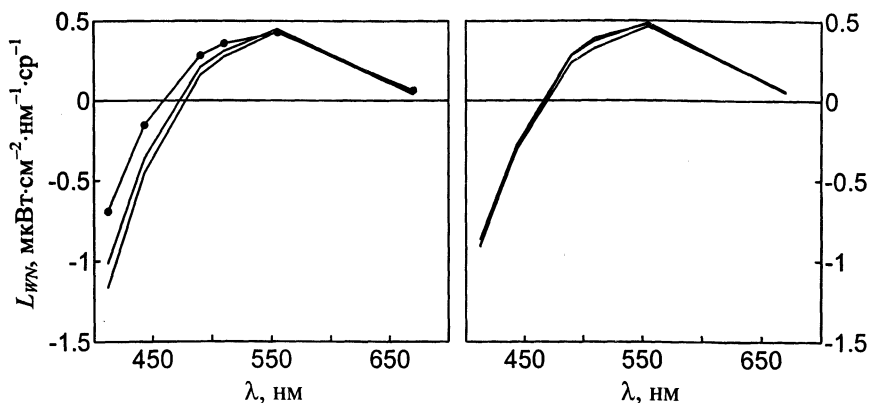
В ряде случаев, кроме флага № 16, значение «1» принимает еще и флаг № 20; его смысл будет рассмотрен ниже. Тот факт, что во многих точках наблюдений флаги № 16 и 20 равны единице, служит указанием на низкую достоверность соответствующих данных. Существенно, однако, что и при нулевых значениях этих флагов получают ненамного лучшие результаты. На рис. 2 сплошной линией с точками выделен один такой спектр, для которого оба флага равны нулю; у него $L_{WN}(412) = -0,615 \text{ мкВт}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{нм}^{-1}\cdot\text{ср}^{-1}$, и соответствующая оценка концентрации хлорофилла a составляет $C_a = 3,91 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ (см. табл. 2). При интерпретации таких противоречивых результатов следует исходить из учета особенностей работы реализованного в NASA алгоритма атмосферной коррекции.

Для определения аэрозольных эффектов в каждой точке на изображении моря используются измерения в двух спектральных интервалах со средними длинами волн $\lambda = 765$ и 865 нм , после чего на основе экстраполяции определяются величины $L_{WN}(\lambda)$ для всего видимого диапазона. В первоначальной версии алгоритма предполагалось, что при $\lambda \geq 765 \text{ нм}$ поглощение света в море настолько велико, что $L_{WN}(\lambda) = 0$, и весь измеряемый в космосе сигнал формируется в атмосфере. Однако такое предположение может нарушаться, когда измерения производятся над участками моря с большим содержанием взвеси в воде; поэтому позже был добавлен программный блок для компенсации соответствующих ошибок за счет применения специальной итерационной процедуры, основанной на определенных модельных соотношениях между величинами $L_{WN}(\lambda)$ в разных спектральных каналах *SeaWiFS*, включая и каналы 765 и 865 нм [3, 15, 16]. Это, в частности, предполагает использование упрощенной параметризации эффектов рассеяния света в воде при $\lambda = 765$ и 865 нм через оценки C_a , которые получаются на предыдущих итерациях.

Для того чтобы проверить эффективность этого алгоритма, полезно сопоставить представленные на рис. 2 спектры с показанными на рис. 3 результатами расчетов по программе *SeaDAS* с дополнительным условием $L_{WN}(\lambda) = 0$ для $\lambda = 765$ и 865 нм (т.е. без применения указанной итерационной процедуры). В расчетах использованы те же исходные данные (формат *Level-1a*), по которым получены примеры, приведенные на рис. 2. Графики на рис. 3 мало различаются между собой и все похожи на те из показанных на рис. 2, у которых $L_{WN}(670) \approx 0$. При этом наименьшие значения I_{510} и C_a

равные 1,19 и 4,77 $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$, получены по отмеченному линией с точками спектру (он соответствует тому же спектру, который выделен точками и на рис. 2).

Наиболее естественным объяснением аномально низких $L_{\text{ИМ}}(412)$ и значительного роста I_{510} служит предположение о плохой работе той части алгоритма атмосферной коррекции, в которой выполняется экстраполяция аэрозольных эффектов в видимую область спектра. В пользу этого предположения говорят известные из литературы свидетельства о том, что к результатам, подобным тем, которые показаны на рис. 3, приводит действие поглощающего аэрозоля. Например, в работе [5] совместно с прямыми измерениями параметров моря и атмосферы такие же спектры получены по данным спутниковых наблюдений Японского моря при интенсивном выносе частиц сажи и пыли с Азиатского континента.



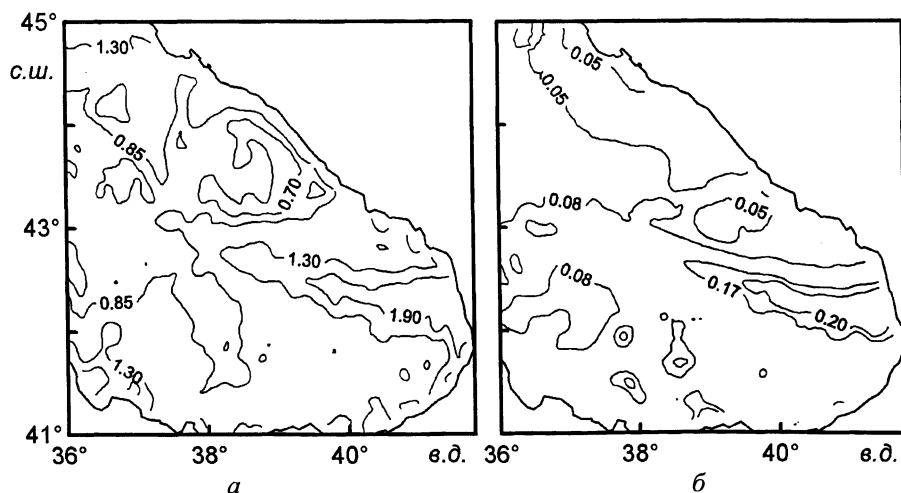
Р и с. 3. Примеры результатов определения спектральной зависимости $L_{\text{ИМ}}(\lambda)$ без применения итерационной процедуры для тех же исходных данных, которые были использованы при подготовке рис. 2 (от 10 октября 1998 г.)

Учитывая действие таких аэрозолей, легко понять и те результаты, которые приведены на рис. 2. По данным измерений в двух каналах 765 и 865 нм специфические особенности аэрозолей, обладающих сильным поглощением, никак не проявляются, и в стандартном алгоритме *NASA* их учет не предусмотрен. Вследствие этого на первых шагах итерационной процедуры ошибочно получаются нереально высокие оценки концентрации хлорофилла, а потом по ним вносятся поправки в данные для $\lambda = 765$ и 865 нм, как если бы при этом имело место повышенное рассеяние света в воде. Поскольку в реальности этого нет, итерационный алгоритм теряет устойчивость, что и отмечается флагом № 20. Значительное различие между показанными на рис. 2 спектрами объясняется именно неустойчивостью стандартного алгоритма атмосферной коррекции. Этот алгоритм работает адекватно только при условии, если реальные оптические свойства воды и атмосферы согласуются с заложенными в нем модельными представлениями. В рассмотренных примерах его применение теряет смысл, так как здесь действуют иные механизмы.

Следует заметить, что в системе обработки данных *SeaWiFS* специально предусмотрена индикация наблюдений в условиях с сильно поглощающим аэрозолем (флаг № 18). Применяемый для этого критерий имеет аналогию с выявлением ситуаций с большими по модулю отрицательными значениями $L_{WN}(412)$, однако соответствующая проверка делается не по результатам расчетов $L_{WN}(\lambda)$, а по исходным регистрируемым на спутнике сигналам, относящимся к верхней границе атмосферы [15]. Вместе с тем для всех приведенных здесь примеров флаг № 18 остается равным нулю, поскольку условие его включения предполагает более интенсивные проявления эффектов поглощения.

Описанные выше результаты для 10 октября 1998 г. не являются редким исключительным случаем. Осенью 1998 г. подобные же аномальные условия, допускающие тем не менее однозначное истолкование, наблюдались в Черном море на больших по площади участках в различных его районах 12, 26 – 30 сентября, 4, 12, 15 октября.

На рис. 4 для 12 сентября схематически показаны пространственные распределения результатов определения оптической толщины аэрозоля $\tau_A(865)$ при $\lambda = 865$ нм и концентрации хлорофилла в восточной части моря. Здесь отчетливо прослеживаются одинаковые контрастные образования в виде вытянутой далеко в открытое море суживающейся полосы с повышенными значениями этих параметров. В ее пределах спектры $L_{WN}(\lambda)$ имеют такую же форму, как на рис. 3. При этом $L_{WN}(412) < -0,2$ мкВт·см⁻²·нм⁻¹·ср⁻¹, концентрация хлорофилла a превышает $1,9$ мг·м⁻³ (в отдельных точках C_a доходит до $\approx 4 - 5$ мг·м⁻³), но на окружающей площади моря $L_{WN}(412) > 0$ и характерный уровень $C_a \approx 0,8 - 1,0$ мг·м⁻³. За два дня до показанной на рис. 4 съемки, т.е. 10 сентября, значения $C_a \approx 0,8 - 1,0$ мг·м⁻³ получены на всей площади этого района моря, включая и ту область, в которой 12 сентября C_a имеет существенно более высокий уровень.



Р и с. 4. Результаты определения концентрации хлорофилла a в воде C_a , мг·м⁻³ (а) и оптической толщины аэрозольной составляющей атмосферы $\tau_A(865)$ при $\lambda = 865$ нм (б) в восточной части Черного моря 12 сентября 1998 г.

Такое сильное различие в полях концентрации хлорофилла для 10 и 12 сентября и показанная на рис. 4 отчетливая корреляция между C_a и $\tau_A(865)$ ясно указывают на то, что повышенные значения концентрации хлорофилла 12 сентября являются ошибочными и они возникли в результате действия атмосферных искажений, аналогичных тем, которые проявились в западной части моря 10 октября. По-видимому, показанная на рис. 4, б картина контрастов в поле $\tau_A(865)$ отражает специфический процесс распространения поглощающего аэрозоля в атмосфере. В этой связи представляют интерес примеры спутниковых радиолокационных наблюдений восточной части Черного моря 17 и 20 марта 1996 г. [17]. На приведенных в этой работе трех изображениях отчетливо видна почти точно такая же по форме узкая протяженная полоса, уходящая от Кавказского побережья далеко в открытое море. В [17] она отождествлена с направленной на запад мощной струей ветра, возникновение которой могло быть обусловлено особенностью рельефа местности в этой части побережья.

Следует заметить, однако, что 12 сентября 1998 г. флаги № 16, 18, 20 имеют нулевые значения на всей площади моря, кроме небольшого числа изолированных точек. Основное назначение флагов в системе обработки данных *SeaWiFS* заключается в выполнении отбраковки недостоверных данных на этапе формирования итоговых продуктов третьего уровня (формат *Level-3*). Приведенные примеры говорят о том, что соответствующие флагам № 16, 18, 20 критерии не обеспечивают надежного выделения достаточно серьезных атмосферных искажений, с которыми приходится сталкиваться при наблюдениях Черного моря.

Другие флаги, помимо рассмотренных выше, имеют более технический или формальный характер (например, индикация съемок при слишком большом зенитном угле Солнца, получение концентрации хлорофилла, выходящей за пределы заданных границ и т.п.). В рассматриваемой здесь задаче такие флаги не очень важны; следует, однако, отметить, что хотя в системе предусмотрен специальный флаг (№ 8), отмечающий отрицательные значения $L_{W/N}(\lambda)$, при подготовке стандартных продуктов формата *Level-3* он игнорируется. Данные формата *Level-3* представляют собой конечные продукты стандартной обработки результатов спутниковых наблюдений, удобные при решении разнообразных практических задач. Именно такие данные, отобранные по глубоководной части Черного моря, были использованы в упомянутой выше работе [8] для анализа изменений концентрации хлорофилла с течением времени. Приведенные нами примеры атмосферных искажений позволяют понять, что причина получения в [8] аномально высоких оценок концентрации хлорофилла для осени 1998 г. заключается в ошибках атмосферной коррекции.

Из литературы известны подходы, имеющие целью выполнение атмосферной коррекции и определение $L_{W/N}(\lambda)$ с учетом эффектов поглощения света частицами аэрозоля [6, 7], однако они слишком сложны для реализации в системе операционной обработки спутниковых данных и основываются на ряде допущений, которые с трудом могут быть обоснованы в тех или иных реальных условиях. Поэтому при практическом использовании данных на-

блюдений Черного моря целесообразно применять более жесткую отбраковку атмосферных искажений, например, с дополнительным требованием $L_{WN}(412) > \delta$, где порог δ может быть задан в зависимости от особенностей конкретных решаемых задач и с учетом приближенных априорных представлений об оптических свойствах моря в рассматриваемом районе. В большинстве случаев достаточно положить $\delta = 0$. Более подробное обсуждение этого вопроса дано в [2].

Для периода времени между 2 и 20 октября из-за облачности и необходимости исключения ситуаций, при которых $L_{WN}(412) < 0$, сложно построить карты, аналогичные показанным на рис. 1, и с большой уверенностью определить значения I_{510} и C_a по всей площади моря. Тем не менее в отдельные дни могут быть выделены разрозненные небольшие безоблачные участки, в которых к тому же свойства аэрозоля можно считать благоприятными в указанном выше смысле. Если судить по этим данным, в глубоководной части моря уровни I_{510} и C_a не имели принципиальных отличий от тех, которые приведены для этих дней на рис. 1 и в табл. 1. То же самое относится и к другим промежуткам времени между теми днями, которые отражены на рис. 1 и в табл. 1.

В целом полученные результаты говорят о том, что в различные дни осенью 1998 г. атмосферный аэрозоль над Черным морем имел существенно разные оптические свойства. Наряду с ситуациями, когда использование спутниковых данных оказывалось практически невозможным, достаточно часто имели место также и более благоприятные условия. В эти дни спутниковые измерения концентрации хлорофилла в открытом море неплохо соответствуют известным из литературы результатам прямого определения этой величины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Суетин В.С., Королев С.Н., Суслин В.В., Кучерявый А.А. Проявления атмосферных искажений в данных спутникового прибора SeaWiFS в окрестности океанографической платформы в Качивели летом 2002 г. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2004. – Вып. 11. – С. 174 – 183.
3. Patt F.S., Barnes R.A., Eplee R.E. et al. Algorithms updates for the fourth SeaWiFS data reprocessing // NASA Tech. Memo. 2003-206892. – NASA Goddard Space Flight Center. – 2003. – 22. – 74 p.
4. Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Ershova S.V. et al. Application of SeaWiFS data for studying variability of bio-optical characteristics in the Barents, Black and Caspian Seas // Deep-Sea Res. – 2004. – Part II. – 51. – P. 1063 – 1091.
5. Li L., Fukushima H., Frouin R. et al. Influence of submicron absorptive aerosol on Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS)-derived marine reflectance during Aerosol Characterization Experiment (ACE)-Asia // J. Geophys. Res. – 2003. – 108, № D15. – 4472, doi:10.1029/2002JD002776.
6. Gohin F., Druon J.N., Lampert L. A five channel chlorophyll concentration algorithm applied to SeaWiFS data processed by SeaDAS in coastal waters // Int. J. Rem. Sens. – 2002. – 23, № 8. – P. 1639 – 1661.

7. *Chomko R.M., Gordon H.R.* Atmospheric correction of ocean color imagery: test of the spectral optimization algorithm with the Sea-viewing Wide Field-of-View Sensor // *Appl. Opt.* – 2001. – 40, № 18. – P. 2973 – 2984.
8. *Незлин Н.П.* Необычное цветение Черного моря в 1998 – 1999 гг. (анализ спутниковых данных) // *Океанология.* – 2001. – 41, № 3. – С. 394 – 399.
9. *Берсенева Г.П., Чурилова Т.Я., Георгиева Л.В.* Сезонная изменчивость хлорофилла и биомассы фитопланктона в западной части Черного моря // Там же. – 2004. – 44, № 3. – С. 389 – 398.
10. *Baith K., Lindsay R., Fu G. et al.* SeaDAS: Data Analysis System Developed for Ocean Color Satellite Sensors // *Eos Trans. AGU.* – 2001. – 82. – P. 202.
11. *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.
12. *O'Reilly J.E., Maritorena S., O'Brien M.C. et al.* SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses. Part 3 // NASA Tech. Memo. 2000-206892. – NASA Goddard Space Flight Center. – 2000. – 11. – 49 p.
13. *Siegel D.A., Maritorena S., Nelson N.B. et al.* Global distribution and dynamics of colored dissolved and detrital organic materials // *J. Geophys. Res.* – 2002. – 107, № C12. – 3228, doi:10.1029 / 2001JC000965.
14. *Burenkov V.I., Kopelevich O.V., Sheberstov S. et al.* Bio-optical characteristics of the Aegean Sea retrieved from satellite ocean color data // *The Eastern Mediterranean as a Laboratory Basin for the Assessment of Contrasting Ecosystems* / Eds. P. Malanotte-Rizzoli, V.N. Eremeev. – Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1999. – P. 313 – 326.
15. *McClain C.R., Barnes R.A., Eplee R.E. et al.* SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses. Part 2 // NASA Tech. Memo. 2000-206892. – NASA Goddard Space Flight Center. – 2000. – 10. – 57 p.
16. *Siegel D.A., Wang M., Maritorena S. et al.* Atmospheric correction of satellite ocean color imagery: The black pixel assumption // *Appl. Opt.* – 2000. – 39. – P. 3582 – 3591.
17. *Пустовойтенко В.В.* Экологический мониторинг морских акваторий: проблемы экологии Черного моря // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.* – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2004. – Вып. 11. – С. 213 – 225.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 03.11.06

ABSTRACT The example of the analysis of a series of the Black Sea satellite observations in autumn, 1998 shows that in some cases substantial atmospheric correction errors take place in all SeaWiFS spectral bands that results in significant errors in calculations of the chlorophyll concentration carried out according to the NASA standard algorithm. After filtering out the data with negative values of the normalized water-leaving radiance in the spectral band 412 nm, the chlorophyll concentrations are in agreement with the published before in situ measurements. The main features of the atmospheric correction algorithm used by NASA which are valuable for interpretation of the Black Sea observation data are discussed in details.