

## Использование спутниковых данных для определения характеристик поглощения света в водах Черного моря

В. С. Суетин, С. Н. Королев ✉

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия  
✉ s.korolev@mhi-ras.ru

Поступила в редакцию 16.06.2020 г., после доработки – 30.09.2020 г.

**Цель.** Предметом изучения в настоящей работе являются эффекты поглощения света в водах Черного моря с учетом вариаций отдельных его составляющих и того, как они проявляются в содержащихся в архиве NASA результатах расчета концентрации хлорофилла *a*, полученных при обработке спутниковых данных с использованием универсального операционного метода. **Методы и результаты.** Анализировались содержащиеся в архиве NASA данные спутниковых приборов MODIS и SeaWiFS и определенные по ним с помощью комплексного метода *Generalized ocean color inversion model for retrieving marine inherent optical properties (GIOP)* значения составляющих показателя поглощения света, связанных с желтым веществом и фитопланктоном. Для того чтобы избежать вероятных проявлений различного рода искажений в результатах определения спектральных коэффициентов яркости моря и продуктов применения метода *GIOP*, были использованы только специальным образом отобранные достаточно достоверные тестовые данные из двух участков, расположенных вблизи Южного берега Крыма и к югу от устья Дуная.

**Выводы.** В рассмотренных примерах при низком содержании хлорофилла *a* в воде преобладающую роль в поглощении света в синей части спектра играет желтое вещество, при высоком его уровне доминирует вклад фитопланктона. Установленное соотношение между составляющими показателя поглощения света, связанными с желтым веществом и фитопланктоном, существенно отличается от того, которое неявным образом заложено в основу используемого в NASA в ходе оперативной обработки спутниковых данных универсального метода определения концентрации хлорофилла *a*. Это в свою очередь проявляется в том, что содержащиеся в архиве NASA данные о концентрации хлорофилла *a* в Черном море могут быть завышенными при низком его уровне и заниженными – при высоком.

**Ключевые слова:** Черное море, спутниковые наблюдения, оптические характеристики, поглощение света, MODIS, SeaWiFS, GIOP, фитопланктон, желтое вещество

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2020-0002 «Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений». Авторы выражают благодарность группе обработки спутниковой информации NASA GSFC за предоставленную возможность использования эмпирического материала.

**Для цитирования:** Суетин В. С., Королев С. Н. Использование спутниковых данных для определения характеристик поглощения света в водах Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 2. С. 222–232. doi:10.22449/0233-7584-2021-2-222-232

# Application of Satellite Data for Retrieving the Light Absorption Characteristics in the Black Sea Waters

V. S. Suetin, S. N. Korolev ✉

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

✉ s.korolev@mhi-ras.ru

**Purpose.** The work is aimed at studying the effects of light absorption in the Black Sea waters with due regard for the variations of its individual components, and how they are manifested in the NASA archival results of calculating the chlorophyll *a* concentration obtained by processing satellite data using the universal operational method.

**Methods and Results.** The NASA archival data of the MODIS and SeaWiFS satellite instruments, and the values of the light absorption components (determined by the method of *Generalized ocean color inversion model for retrieving marine inherent optical properties (GIOP)*) related to yellow substance and phytoplankton were analyzed. In order to avoid possible manifestations of various distortions in the results of determining the remote sensing reflectances of the sea and in the products resulted from application of the GIOP method, only the specially selected and sufficiently reliable test data from two areas located near the Crimea Southern Coast and south of the Danube estuary were used.

**Conclusions.** In the considered examples with low content of chlorophyll *a* in the seawater, the yellow substance plays a predominant role in light absorption in the spectrum blue part, whereas if the chlorophyll *a* content is high, the phytoplankton contribution is dominant. The revealed relationship between the light absorption components related to yellow substance and phytoplankton significantly differs from that implicitly preset as a basis of the universal method (applied in NASA for the satellite data operational processing) for determining the chlorophyll *a* concentration. This, in its turn, is manifested in the fact that the data on the chlorophyll *a* concentration in the Black Sea stored in the NASA archive may be overestimated in case the chlorophyll *a* concentration is low, and underestimated – in case it is high.

**Keywords:** Black Sea, satellite observations, optical characteristics, light absorption, MODIS, SeaWiFS, GIOP, phytoplankton, yellow substance

**Acknowledgments:** The work was carried out within the framework of the state task on theme No. 0827-2020-0002 "Development of methods of operational oceanology based on interdisciplinary studies of the processes of formation and evolution of the marine environment and mathematical modeling using remote and contact measurement data." The authors are grateful to the NASA GSFC satellite data processing group for the provided opportunity to use the empirical data.

**For citation:** Suetin, V.S. and Korolev, S.N., 2021. Application of Satellite Data for Retrieving the Light Absorption Characteristics in the Black Sea Waters. *Physical Oceanography*, [e-journal] 28(2), pp. 205-214. doi:10.22449/1573-160X-2021-2-205-214

## Введение

Использование данных космических дистанционных наблюдений в видимом диапазоне спектра дает возможность определения числовых значений оптических характеристик воды в море. Для решения этой задачи необходимо применение специальных комплексных методов обработки и интерпретации результатов измерений излучения работающей в космосе аппаратурой. Возникающий при этом круг вопросов с общих позиций рассмотрен в [1–3].

Предметом изучения в настоящей работе являются эффекты поглощения света в водах Черного моря. Отдельные примеры анализа с этой целью данных спутниковых приборов SeaWiFS и MODIS приведены в [4, 5]. Результаты исследований особенностей поглощения света в водах Черного моря, полученные с использованием натуральных измерений, содержатся в [6–8]. В рамках находящихся

практическое применение оптических моделей учитываются вариации составляющих показателя поглощения, обусловленных фитопланктоном  $a_{ph}(\lambda)$  и желтым веществом (вместе с детритом)  $a_{dg}(\lambda)$  ( $\lambda$  – длина волны излучения). Такая информация необходима при изучении экологических процессов, моделировании условий формирования светового поля в море. Оптические характеристики воды в Черном море претерпевают значительную изменчивость, обусловленную разнообразием протекающих в нем процессов и явлений, поэтому полезно рассмотреть новые примеры использования спутниковых данных для их изучения.

Надежное раздельное определение составляющих показателя поглощения  $a_{ph}(\lambda)$  и  $a_{dg}(\lambda)$  по спутниковым измерениям представляет собой довольно трудную задачу, тем не менее существуют методы для ее решения [1–3, 5, 6]. Актуальность изучения этой задачи обусловлена тем, что величина  $a_{ph}(\lambda)$  непосредственно связана с важнейшим индикатором биологической продуктивности моря – концентрацией хлорофилла  $a$ , тогда как вариации составляющей поглощения света  $a_{dg}(\lambda)$  могут служить помехой при определении его содержания в воде по спутниковым данным. К тому же поглощение света желтым веществом вызывает самостоятельный интерес, поскольку в водах Черного моря оно способно вносить значительный вклад в общее поглощение [4–8]. Ранее в [4, 5] были описаны результаты определения величин  $a_{ph}(\lambda)$  и  $a_{dg}(\lambda)$  в глубоководной части Черного моря, в данной работе рассматриваются новые примеры анализа наблюдений районов, расположенных ближе к берегу.

### Материалы и методы

Установленные на спутнике приборы регистрируют уходящее в космос излучение различных длин волн видимого диапазона; результаты этих измерений зависят от многих переменных факторов, которые в общем случае следует рассматривать как неизвестные параметры. Для определения их числовых значений необходимо проведение цепочки преобразований исходных данных. С этой целью могут применяться разные по сложности методы и алгоритмы [1, 3]. Представленные ниже результаты получены с использованием содержащихся в архиве NASA (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>) продуктов обработки данных приборов *SeaWiFS* и *MODIS (Aqua)* комплексным методом *Generalized ocean color inversion model for retrieving marine Inherent Optical Properties (GIOP)* [2, 3]. Метод *GIOP* основывается на поиске модельного описания эмпирических спектральных значений коэффициента яркости морской поверхности  $R_{rs}(\lambda)$ , определяемых на одном из первых этапов обработки спутниковых измерений при выполнении атмосферной коррекции. При этом используются физические модели, в функциональной форме выражающие зависимость  $R_{rs}(\lambda)$  от длины волны света и от содержания в воде основных примесей или их оптических свойств при некоторых фиксированных  $\lambda$ . В методе *GIOP* вариации поглощения света в море учитываются двумя переменными параметрами –  $a_{ph}(443)$  и  $a_{dg}(443)$ . Один из ключевых элементов этого метода состоит в однофакторном представлении спектральной зависимости  $a_{ph}(\lambda)$  в виде функции от концентрации хлорофилла  $a$  на основе статистической модели из [9]. К настоящему времени в Черном море выполнено мало прямых исследований характеристик поглощения, но имеющиеся в литерату-

ре сведения (см., напр., [6–8]) не противоречат используемым в методе *GIOP* модельным представлениям. Строго говоря, не исключено, что в рассматриваемых нами районах моря оптические свойства воды имеют специфические особенности, отличные от тех, которые учтены в методе *GIOP*, в связи с чем в дальнейшем может потребоваться уточнение результатов, полученных с использованием этого метода.

Результаты обработки спутниковых данных методом *GIOP* доступны в архиве *NASA* в удобном цифровом формате без потери пространственно-временного разрешения. Архивные файлы в числе прочих параметров содержат  $a_{ph}(443)$ ,  $a_{dg}(443)$ , по которым с помощью модели *GIOP* можно вычислить  $a_{ph}(\lambda)$  и  $a_{dg}(\lambda)$  для всех других длин волн. Примеры полных спектров этих величин приведены в [5].

Помимо параметров поглощения ниже рассматриваются также оценки концентрации хлорофилла  $a$ . Через  $C_a$  будем обозначать результаты ее определения с использованием универсального метода *OC3m*, которые содержатся в архиве *NASA* непосредственно в числе стандартных продуктов операционной обработки спутниковых данных. В качестве альтернативного варианта, обозначаемого как  $C_{a1}$ , полезно также рассматривать результаты вычисления хлорофилла  $a$  согласно модели из [9] по следующей формуле:  $C_{a1} = 222a_{ph}(443)^{1.64}$ . Как правило, в Черном море величины  $C_a$  и  $C_{a1}$  различаются; интересно их сопоставить и понять причины этого различия.

При практической реализации метода *GIOP* существенное ограничение обусловлено тем, что результаты определения  $R_{rs}(\lambda)$  часто не обладают достаточно высокой надежностью [10–12], и это приводит к снижению достоверности итоговых значений  $a_{ph}(443)$  и  $a_{dg}(443)$ . Причины возникновения искажений связаны со сложностью выполнения атмосферной коррекции, проявлениями солнечного блика, погрешностями задания калибровочных параметров прибора и др. Заметим, что проблема, связанная с искажениями в  $R_{rs}(\lambda)$ , актуальна не только для Черного моря, но и для многих других акваторий [12–15].

Вместе с тем источники искажений, как правило, обладают переменным характером, и поэтому в ряде случаев могут иметь место условия, достаточно благоприятные для применения метода *GIOP*. Соответственно, для получения надежных выводов имеет смысл анализировать только специальным образом выделенные ситуации с наиболее достоверными значениями  $R_{rs}(\lambda)$ . Реализованная в *NASA* система обработки спутниковых измерений предусматривает выполнение операций выявления и исключения из числа пригодных для использования отсчетов, имеющих низкую достоверность, но для повышения точности результатов, полученных с помощью процедуры *GIOP*, полезно дополнительно учитывать требования, основанные на более жестких критериях, сформулированных и испытанных в [4, 5].

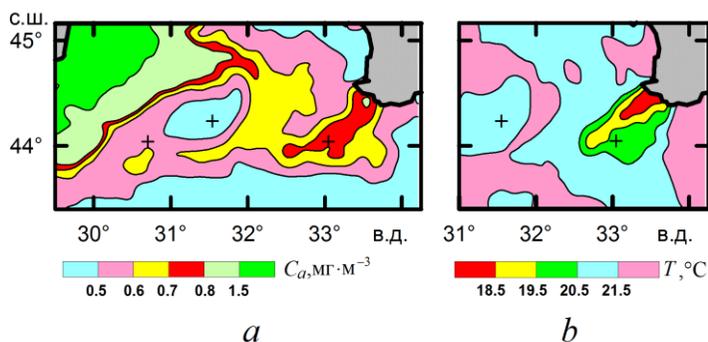
Эти требования заключаются в том, чтобы в пределах протяженных безоблачных участков моря не было резких хаотичных пространственно-временных флуктуаций всех определяемых величин, включая параметры атмосферы, и ложных локальных корреляций между продуктами расчетов характеристик атмосферы и морской воды. Кроме того, необходимо достаточно точное модельное воспроизведение эмпирических спектров  $R_{rs}(\lambda)$  и совпадение результатов, полученных по данным приборов *SeaWiFS* и *MODIS*.

Известно, что при реализации таких методов, как *GIOP*, могут проявляться эффекты, связанные с неустойчивостью или неоднозначностью решения многомерной оптимизационной задачи. Однако в результате выполненной дополнительной проверки было установлено, что для рассматриваемых тестовых примеров подобные эффекты не имеют существенного значения.

Применение перечисленных критериев приводит к значительному сокращению объема данных, пригодных для проведения детальных исследований Черного моря, однако опыт показывает, что при этом остается возможность проведения анализа отдельных достаточно интересных демонстрационных примеров. За период 2002–2010 гг. в архиве *NASA* было накоплено большое количество таких съемок приборами *SeaWiFS* и *MODIS (Aqua)*, которые можно считать практически синхронными и которые отражают широкое разнообразие изменчивости оптических свойств воды в разных районах и в разные годы.

### Результаты и их обсуждение

В качестве первого примера рассмотрим результаты съемок района вблизи Крымского п-ова в июне 2009 г. На рис. 1 для этого района показаны построенные по содержащимся в архиве *NASA* результатам обработки данных прибора *MODIS* схематические карты пространственного распределения величины  $C_a$  19.06.2009 г. и температуры поверхности моря 18.06.2009 г. Как известно, во многих ситуациях  $C_a$  может заметно отличаться от реального содержания хлорофилла  $a$  в Черном море. Тем не менее рис. 1 позволяет косвенным образом судить о пространственном распределении оптических свойств воды в этом районе. На картах этого рисунка выделяется характерный пространственный образ прибрежного апвеллинга, в котором повышение концентрации хлорофилла  $a$  ассоциируется с понижением температуры воды [16, 17]. Как правило, при изучении апвеллинга в первую очередь учитывают контрасты в поле температуры воды, однако полезно также рассмотреть его проявление в характеристиках поглощения света.



**Рис. 1.** Карты пространственного распределения величины  $C_a$  (a) и температуры поверхности  $T$  (b) вблизи Крымского п-ова 19.06.2009 г. и 18.06.2009 г. соответственно. Крестики – положение анализируемых тестовых отсчетов

**Fig. 1.** Maps of spatial distribution of the  $C_a$  value (a) and the surface temperature  $T$  (b) near the Crimea Peninsula on June 19 and 18, 2009, respectively. Crosses denote the positions of the analyzed test samples

В табл. 1 приведены отобранные из показанной на рис. 1 области моря достаточно надежные результаты обработки измерений, выполненных прибором *SeaWiFS* 19.06.2009 г. В архиве *NASA* эти данные представляют собой отсчеты в единичных узлах регулярной координатной сетки (с шагом ~ 9 км) стандартного формата *Level-3m*. Величины  $a_{ph}(443)$  и  $a_{dg}(443)$  в табл. 1 для длины волны  $\lambda = 443$  нм достаточно показательны, и рассматривать их для других длин волн нет необходимости. Приведенные результаты относятся к области (44,04° с. ш.; 33,04° в. д.) с пониженной температурой воды; в этой области  $a_{ph}(443)$  в 1,5 раза выше, чем в соседних участках. Контраст в поле  $a_{dg}(443)$  не столь велик, но везде желтое вещество вносит преобладающий вклад в общее поглощение света. Эту особенность оптических свойств воды в Черном море необходимо учитывать при определении полных спектров поглощения, а также при более точном расчете концентрации хлорофилла  $a$  по результатам космических измерений. Приведенные в табл. 1 данные отражают в целом пространственное распределение рассматриваемых параметров в показанном на рис. 1 районе моря. Полученные здесь величины  $C_a$  и  $C_{a1}$  заметно различаются, причем  $C_a > C_{a1}$ . При этом в поле величины  $C_{a1}$  прослеживается по сути такая же картина локальных контрастов, как и на показанной на рис. 1 карте величины  $C_a$ . Отличие между ними сводится к разнице в общем уровне и наложении не слишком значительных искажений и флуктуаций.

Т а б л и ц а 1  
T a b l e 1

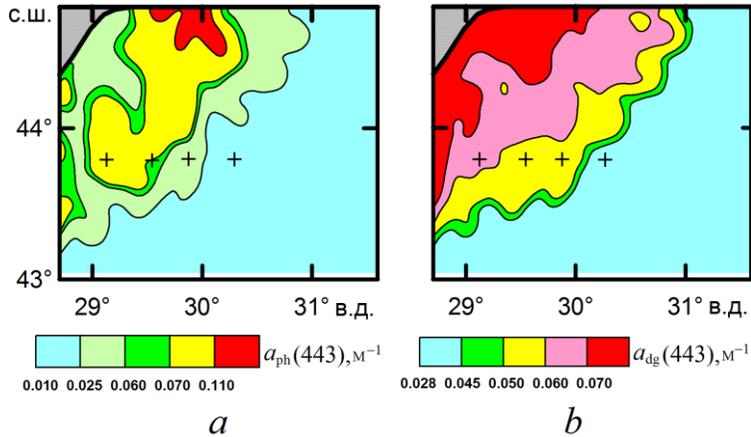
**Результаты определения концентрации хлорофилла  $a$  и оптических параметров воды в Черном море 19.06.2009 г.**  
**Results of retrieving the chlorophyll  $a$  concentration and the optical parameters in the Black Sea waters, 19.06.2009**

Координаты° / Coordinates°		$a_{ph}(443), \text{м}^{-1} /$ $a_{ph}(443), \text{m}^{-1}$	$a_{dg}(443), \text{м}^{-1} /$ $a_{dg}(443), \text{m}^{-1}$	$C_a, \text{мг} \cdot \text{м}^{-3} /$ $C_a, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$C_{a1}, \text{мг} \cdot \text{м}^{-3} /$ $C_{a1}, \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
с. ш. / N	в. д. / E				
44,29	31,54	0,0134	0,0447	0,47	0,19
44,04	30,71	0,0189	0,0478	0,56	0,33
44,04	33,04	0,0230	0,0503	0,71	0,47

Закономерности вариаций приведенных в табл. 1 величин аналогичны тем, которые ранее были установлены в [5] по наблюдениям глубоководной части Черного моря, и характеризуются сравнительно низкими значениями  $a_{ph}(\lambda)$  и  $a_{dg}(\lambda)$ , поэтому в качестве другого примера интересно рассмотреть результаты съемки района вблизи устья р. Дунай со значительными пространственными контрастами, обусловленными выносом речных вод, содержащих большое количество разнообразных примесей.

На рис. 2 показаны построенные по результатам космической съемки прибором *MODIS* 12.08.2006 г. схематические карты пространственного

распределения величин  $a_{ph}(443)$  и  $a_{dg}(443)$  в этом районе. На этих картах выделяется имеющий сложную форму типичный образ речного выноса с повышенным уровнем параметров поглощения света в воде. Результаты обработки спутниковых измерений, относящиеся к четырем репрезентативным узлам координатной сетки формата *Level-3m* из показанной на рис. 2 области, приведены в табл. 2. Эти данные перекрывают широкие интервалы изменений от практически самых низких встречающихся в Черном море значений рассматриваемых величин до аномально высоких, проявляющихся вблизи берега и в шельфовой зоне.



**Р и с. 2.** Карты пространственного распределения величин  $a_{ph}(443)$  и  $a_{dg}(443)$  вблизи устья р. Дунай, построенные по данным прибора *MODIS (Aqua)* от 12.08.2006 г. Крестики – положение анализируемых тестовых отсчетов

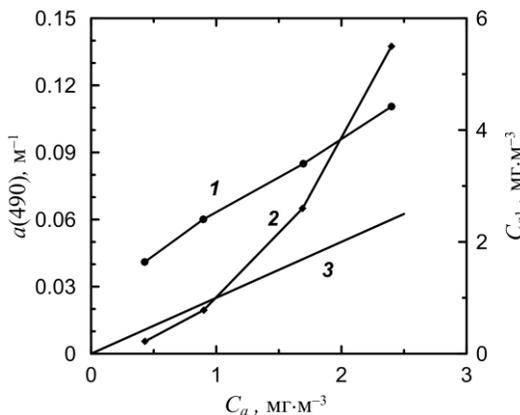
**Fig. 2.** Maps of spatial distribution of the  $a_{ph}(443)$  and  $a_{dg}(443)$  values near the Danube mouth constructed based on the *MODIS (Aqua)* data (12.08.2006). Crosses are the positions of the analyzed test samples

Т а б л и ц а 2  
T a b l e 2

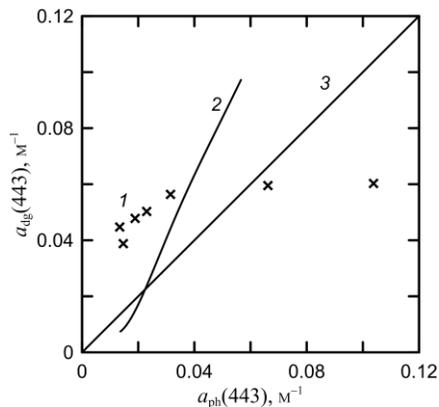
**Результаты определения концентрации хлорофилла *a* и оптических параметров воды в Черном море 12.08.2006 г.**  
**Results of retrieving the chlorophyll *a* concentration and the optical parameters in the Black Sea waters, 12.08.2006**

Координаты° / Coordinates°		$a_{ph}(443)$ , $m^{-1}$ / $a_{ph}(443)$ , $m^{-1}$	$a_{dg}(443)$ , $m^{-1}$ / $a_{dg}(443)$ , $m^{-1}$	$C_a$ , $mg \cdot m^{-3}$ / $C_a$ , $mg \cdot m^{-3}$	$C_{a1}$ , $mg \cdot m^{-3}$ / $C_{a1}$ , $mg \cdot m^{-3}$
с. ш. / N	в. д. / E				
43,79	29,13	0,1038	0,0603	2,40	5,40
43,79	29,54	0,0662	0,0595	1,69	2,60
43,79	29,88	0,0315	0,0564	0,90	0,78
43,79	30,29	0,0147	0,0388	0,43	0,22

Закономерности их вариаций в интервале низких значений аналогичны тем, которые описаны выше для района, расположенного к югу от побережья Крымского п-ова. Здесь  $a_{dg}(443) > a_{ph}(443)$  и  $C_a > C_{a1}$ . При более высоких значениях картина меняется на противоположную –  $a_{ph}(443)$  становится больше, чем  $a_{dg}(443)$ , и  $C_{a1}$  превышает  $C_a$ . В наглядном виде соотношение между  $C_a$  и  $C_{a1}$  для тестовых данных из табл. 2 показано на рис. 3. Совпадение этих величин происходит при их равенстве  $1 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ .



**Р и с. 3.** Зависимости величин  $a(490)$  и  $C_{a1}$  от  $C_a$  для представленных в табл. 2 тестовых данных: 1 –  $a(490)$ ; 2 –  $C_{a1}$ ; 3 –  $C_{a1} = C_a$  (прямая линия)  
**F i g. 3.** Dependences of the  $a(490)$  and  $C_{a1}$  values on  $C_a$  for the test data in Table 2: 1 –  $a(490)$ ; 2 –  $C_{a1}$  and 3 –  $C_{a1} = C_a$  (straight line)



**Р и с. 4.** Соотношение между величинами  $a_{ph}(443)$  и  $a_{dg}(443)$ : 1 – по данным из табл. 1 и 2; 2 – результаты моделирования; 3 –  $a_{dg}(443) = a_{ph}(443)$  (прямая линия)  
**F i g. 4.** Relation between the  $a_{ph}(443)$  and  $a_{dg}(443)$  values: 1 – based on the data from Tables 1 and 2; 2 – simulation results; 3 –  $a_{dg}(443) = a_{ph}(443)$  (straight line)

Содержащиеся в архиве NASA значения величины  $C_a$  вычисляются по формальной процедуре через спектральное отношение  $R(\lambda, \lambda_0) = R_{rs}(\lambda)/R_{rs}(\lambda_0)$  для двух длин волн света  $\lambda$  и  $\lambda_0$ . Выбор того, какие именно спектральные каналы при этом используются, зависит от уровня величины  $R(\lambda, \lambda_0)$ , но это не играет принципиальной роли [18]. Строго говоря, такие формулы не способны обеспечить точный учет всех переменных факторов, от которых зависят величины  $R_{rs}(\lambda)$ , при их произвольной независимой изменчивости.

Как известно, вариации спектрального отношения  $R(\lambda, \lambda_0)$  в основном определяются вариациями поглощения света в море [19, 20]. Поэтому по своему физическому смыслу величина  $C_a$  отличается от реальной концентрации хлорофилла  $a$ . В качестве иллюстрации на рис. 3 по тем же тестовым данным, которые использованы в табл. 2, приведено соотношение между  $C_a$  и показателем полного поглощения света в воде  $a(490)$  при  $\lambda = 490$  нм. Легко видеть, что между этими величинами проявляется отчетливое близкое к линейному соотношение. Поскольку в применяемом в NASA алгоритме расчета концентрации хлорофилла  $a$  производится переключение между спектральными каналами, здесь вместо  $a(443)$  взята величина  $a(490)$ .

С другой стороны, согласно физическому смыслу, в рамках модели *GIOP* должна выполняться взаимно однозначная связь между концентрацией хлорофилла  $a$  и  $a_{\text{ph}}(443)$ . Поэтому результаты вычисления величины  $C_a$  могут быть адекватны реальным значениям концентрации хлорофилла  $a$ , только если изменения величин  $a(\lambda)$  и  $a_{\text{ph}}(\lambda)$  происходят таким образом, что между ними соблюдается некоторое вполне определенное соотношение. Соответствующим образом должны быть связаны между собой переменные составляющие поглощения  $a_{\text{ph}}(\lambda)$  и  $a_{\text{dg}}(\lambda)$ .

В применяемом в *NASA* операционном алгоритме обработки спутниковых измерений *OC3m* эта связь учитывается неявным образом в результате формальной настройки входящих в него коэффициентов на основе предварительного анализа большого массива данных прямых тестовых измерений величин  $R_{rs}(\lambda)$  и концентрации хлорофилла  $a$  в воде так, чтобы в итоге отражалась обобщенная в статистическом смысле закономерность изменчивости условий в Мировом океане. Соответствующее функциональное соотношение между  $a_{\text{ph}}(443)$  и  $a_{\text{dg}}(443)$  можно установить путем расчетов по модели *GIOP*, принимая во внимание те формулы, которые используются в этом алгоритме.

С этой целью была выполнена серия модельных расчетов, в которой на достаточно густой сетке в координатах  $\{a_{\text{ph}}(443), a_{\text{dg}}(443)\}$  по модели *GIOP* вычисляются спектры  $R_{rs}(\lambda)$  и по ним через алгоритм *OC3m* получаются расчетные значения концентрации хлорофилла  $a$  (для них примем обозначение  $C_a(\text{OC3m})$ ). Затем путем прямого перебора вариантов на сетке отыскиваются такие значения  $a_{\text{dg}}(443)$ , для которых при каждом фиксированном входном  $a_{\text{ph}}(443)$  выполняется равенство

$$C_a(\text{OC3m}) = 222a_{\text{ph}}(443)^{1,64}.$$

Дополнительные тестовые расчеты говорят о том, что вариациями параметра рассеяния при этом можно пренебречь. Это объясняется тем, что в алгоритме *OC3m* фигурирует отношение  $R_{rs}(\lambda)$  для близких по спектру значений  $\lambda$ . Результаты таких расчетов показаны на рис. 4 сплошной линией.

В пределах интервалов вариаций анализируемых оптических параметров, которые соответствуют рассматриваемым нами условиям в Черном море, показанная на рис. 4 кривая с хорошей точностью аппроксимируется полиномом 5-й степени с коэффициентами 0,048; -8,625; 585;  $-1,4743 \cdot 10^4$ ;  $1,7614 \cdot 10^5$ ;  $-8,11 \cdot 10^5$ . Согласно этому соотношению, при  $a_{\text{ph}}(443) < 0,023 \text{ м}^{-1}$  выполняется условие  $a_{\text{ph}}(443) > a_{\text{dg}}(443)$ , а при более высоких значениях – наоборот:  $a_{\text{ph}}(443) < a_{\text{dg}}(443)$ . Переходному значению  $a_{\text{ph}}(443) = 0,023 \text{ м}^{-1}$  по описанной в [9] модели соответствует концентрация хлорофилла  $a \sim 0,45 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ . Заметим, что при получении таких оценок использовалась описанная в [9] модель, которая соответствует океанским водам так называемого первого типа по известной классификации Мореля [19].

Для сравнения на рис. 4 показаны также данные из табл. 1 и 2. Конфигурация соответствующего множества точек существенно отличается от той связи между  $a_{\text{ph}}(443)$  и  $a_{\text{dg}}(443)$ , которая предполагается в используемом в *NASA* алгоритме вычисления величины  $C_a$ . Это отличие служит объяснением причины различия между приведенными в табл. 1 и 2 величинами  $C_a$  и  $C_{a1}$ . Как уже было отмечено выше,  $C_a$  и  $C_{a1}$  совпадают, если они равны  $1 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ ;

это происходит при  $a_{ph}(443) = 0,037 \text{ м}^{-1}$ ,  $a_{dg}(443) = 0,057 \text{ м}^{-1}$ . Для выяснения того, насколько универсальными являются установленные закономерности изменчивости оптических свойств воды в Черном море, требуется проведение дальнейших исследований.

### Заключение

С использованием спутниковых данных из архива NASA, полученных при обработке методом *GIOP*, рассмотрены участки, расположенные вблизи Южного берега Крыма и к югу от устья Дуная. Выполненный анализ позволяет лучше понять особенности изменчивости оптических свойств воды в Черном море. Результаты анализа показывают специфические проявления вариаций составляющих поглощения света, связанных с желтым веществом и фитопланктоном. Установленное соотношение между этими факторами существенно отличается от того, которое неявным образом заложено в основу используемого в NASA универсального операционного метода определения концентрации хлорофилла *a* в верхнем слое воды.

В рассмотренных тестовых ситуациях при содержании хлорофилла *a*, меньшем  $1 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ , преобладающий вклад в поглощение света с длиной волны 443 нм вносит желтое вещество, но при более высоком содержании хлорофилла *a* доминирует составляющая, обусловленная фитопланктоном. Применяемый в NASA алгоритм дает адекватные оценки концентрации хлорофилла *a*, если соотношение между составляющими поглощения имеет противоположный характер – при низком уровне основную роль играет фитопланктон, при высоком – желтое вещество. Это в свою очередь проявляется в том, что содержащиеся в архиве NASA данные о концентрации хлорофилла *a* в водах Черного моря могут быть завышенными при низком его уровне и заниженными – при высоком.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Remote Sensing of Inherent Optical Properties: Fundamentals, Tests of Algorithms, and Applications // Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group / Ed. Z.-P. Lee. Canada, Dartmouth : IOCCG, 2006. Vol. 5. 126 p. URL: <http://ioccg.org/reports/report5.pdf> (date of access: 11.03.2021).
2. Generalized ocean color inversion model for retrieving marine inherent optical properties / P. J. Werdell [et al.] // Applied Optics. 2013. Vol. 52, iss. 10. P. 2019–2037. <https://doi.org/10.1364/AO.52.002019>
3. An overview of approaches and challenges for retrieving marine inherent optical properties from ocean color remote sensing / P. J. Werdell [et al.] // Progress in Oceanography. 2018. Vol. 160. P. 186–212. <https://doi.org/10.1016/j.pocan.2018.01.001>
4. Суетин В. С., Королев С. Н., Кучерявый А. А. Использование спутниковых наблюдений для определения спектральных зависимостей оптических характеристик вод Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2014. № 3. С. 77–86.
5. Suetin V. S., Korolev S. N. Estimating Specific Features of the Optical Property Variability in the Black Sea Waters Using the Data of SeaWiFS and MODIS Satellite Instruments. // Physical Oceanography. 2018. Vol. 25, iss. 4. P. 330–340. doi:10.22449/1573-160X-2018-4-330-340
6. Bio-Optical Characteristics of the Aegean Sea Retrieved from Satellite Ocean Color Data / V. I. Burenkov [et al.] // The Eastern Mediterranean as a Laboratory Basin for the Assessment of Contrasting Ecosystems / Eds. P. Malanotte-Rizzoli, V. N. Eremeev. Dordrecht : Springer, 1999. P. 313–326. (NATO Science Series. Vol. 51). [https://doi.org/10.1007/978-94-011-4796-5\\_21](https://doi.org/10.1007/978-94-011-4796-5_21)

7. Чурилова Т. Я., Суслин В. В., Сосик Х. М. Спектральная модель подводной облученности в Черном море // Морской гидрофизический журнал. 2009. № 6. С. 33–46.
8. Bio-optical anomalies in the world's oceans: An investigation on the diffuse attenuation coefficients for downward irradiance derived from Biogeochemical Argo float measurements / E. Organelli [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2017. Vol. 122, iss. 5. P. 3543–3564. doi:10.1002/2016JC012629
9. Variations of light absorption by suspended particles with the chlorophyll a concentration in oceanic (case 1) waters: Analysis and implications for bio-optical models. / A. Bricaud [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1998. Vol. 103, iss. C13. P. 31033–31044. <https://doi.org/10.1029/98JC02712>
10. Оптические свойства аэрозолей и атмосферная коррекция спутниковых наблюдений Черного моря / В. С. Суетин [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2013. № 1. С. 34–44.
11. Suetin V. S., Korolev S. N., Kucheryaviy A. A. Sun Glint Manifestation at Evaluating the Black Sea Water Optical Parameters using Satellite Measurements // Physical Oceanography. 2016. No. 3. P. 47–56. doi:10.22449/1573-160X-2016-3-47-56
12. Application of SeaWiFS data for studying variability of bio-optical characteristics in the Barents, Black and Caspian Seas / O. V. Kopelevich [et al.] // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2004. Vol. 51, iss. 10–11. P. 1063–1091. doi:10.1016/j.dsr2.2003.10.009
13. Bailey S. W., Werdell P. J. A multi-sensor approach for the on-orbit validation of ocean color satellite data products // Remote Sensing of Environment. 2006. Vol. 102, iss. 1–2. P. 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.01.015>
14. Hu C., Feng L., Lee Z. Uncertainties of SeaWiFS and MODIS remote sensing reflectance: Implications from clear water measurements. // Remote Sensing of Environment. 2013. Vol. 133. P. 168–182. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.02.012>
15. Assessment of uncertainty in the ocean reflectance determined by three satellite ocean color sensors (MERIS, SeaWiFS and MODIS-A) at an offshore site in the Mediterranean Sea (BOUSSOLE project) / D. Antoine [et al.] // Journal of Geophysical Research. 2008. Vol. 113, iss. C7. C07013. doi:10.1029/2007JC004472
16. Горячкин Ю. Н. Апвеллинг у берегов Западного Крыма // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 5. С. 399–411. doi:10.22449/0233-7584-2018-5-399-411
17. Synoptic upwelling and cross-shelf transport processes along the Crimean coast of the Black Sea / G. Gawarkiewicz [et al.] // Continental Shelf Research. 1999. Vol. 19, iss. 8. P. 977–1005. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(99\)00003-5](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(99)00003-5)
18. O'Reilly J. E., Werdell P. J. Chlorophyll algorithms for ocean color sensors – OC4, OC5 & OC6 // Remote Sensing of Environment. 2019. Vol. 229. P. 32–47. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.04.021>
19. Morel A. In-water and remote measurements of ocean color // Boundary-Layer Meteorology. 1980. Vol 18. P. 177–201. <https://doi.org/10.1007/BF00121323>
20. Analysis of Variability of the Optical Properties of Water in the Black Sea in Summer 1998 According to the Data of a SeaWiFS Satellite Instrument / V. S. Suetin [et al.] // Physical Oceanography. 2002. Vol. 12. P. 331–340. doi:10.1023/A:1021729229168

*Об авторах:*

**Суетин Вадим Сергеевич**, ведущий научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0001-7278-667X**, **Scopus Author ID: 6601986841**, **ResearcherID: M-6879-2018**, **SPIN-код: 5796-6883**, [v.suetin@mhi-ras.ru](mailto:v.suetin@mhi-ras.ru)

**Королев Сергей Николаевич**, младший научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0001-5704-8863**, **Scopus Author ID: 7005603811**, **ResearcherID: M-6584-2018**, **SPIN-код: 9420-9479**, [s.korolev@mhi-ras.ru](mailto:s.korolev@mhi-ras.ru)