

## Оценка особенностей изменчивости оптических свойств вод Черного моря по данным спутниковых приборов *SeaWiFS* и *MODIS*

В. С. Суетин, С. Н. Королев\*

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

\*E-mail: s.korolev@mhi-ras.ru

Поступила в редакцию 28.11.2017 г., после доработки – 14.03.2018 г.

Рассматривается задача количественной интерпретации выполненных спутниковыми приборами *MODIS* и *SeaWiFS* наблюдений Черного моря в терминах спектральных зависимостей оптически активных примесей в воде. С этой целью анализировались содержащиеся в архиве *NASA* результаты стандартной операционной обработки накопленных в разные годы данных с помощью комплексного метода *Generalized ocean color inversion model for retrieving marine inherent optical properties (GIOP)*. Поскольку в этих результатах существенным образом проявляются искажения, связанные с атмосферными помехами, при отборе тестовых данных требовалось, чтобы в протяженных безоблачных участках моря не было резких хаотичных пространственно-временных флуктуаций всех определяемых продуктов и ложных локальных корреляций между параметрами атмосферы и морской воды. Кроме того, накладывались условия достаточно точного модельного воспроизведения эмпирических спектров коэффициента яркости морской поверхности и совпадения результатов, полученных по данным приборов *SeaWiFS* и *MODIS*. Применение метода *GIOP* позволяет анализировать особенности вариаций и относительную роль составляющих поглощения света в верхнем слое воды, связанных с фитопланктоном и растворенным в воде желтым веществом. В глубоководной части Черного моря летом желтое вещество вносит основной вклад в поглощение, а при переходе от лета к осени наблюдается примерно одинаковое увеличение этих двух факторов. В качестве примера дополнительно выполнено сравнение особенностей вод Черного моря и экваториального района Тихого океана. В отличие от Черного моря в этом районе основным фактором является фитопланктон, тогда как содержание желтого вещества почти не меняется.

**Ключевые слова:** Черное море, Тихий океан, спутниковые наблюдения, спектральные зависимости, оптические характеристики, *MODIS*, *SeaWiFS*, *GIOP*, фитопланктон, желтое вещество.

**Благодарности:** авторы выражают благодарность группе обработки спутниковой информации *NASA GSFC* (URL: <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>) за предоставленную возможность использования эмпирического материала. Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2014-0011 «Исследования закономерностей изменений состояния морской среды на основе оперативных наблюдений и данных системы диагноза, прогноза и реанализа состояния морских акваторий» (шифр «Оперативная океанография»).

**Для цитирования:** Суетин В. С., Королев С. Н. Оценка особенностей изменчивости оптических свойств вод Черного моря по данным спутниковых приборов *SeaWiFS* и *MODIS* // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 4. С. 357–368. doi:10.22449/0233-7584-2018-4-357-368

## Estimating Specific Features of the Optical Properties' Variability in the Black Sea Waters Using the Data of Satellite Instruments *SeaWiFS* and *MODIS*

V. S. Suetin, S. N. Korolev\*

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

\*e-mail: s.korolev@mhi-ras.ru

Problem of quantitative interpretation of the Black Sea observations provided by the satellite instruments *SeaWiFS* and *MODIS* is considered in the terms of spectral dependencies of the seawater optically active components. For

© Суетин В. С., Королев С. Н., 2018

this purpose, the results of standard data (accumulated in the NASA archive) processing by the complex method GIOP (Generalized ocean color Inversion model for retrieving marine inherent Optical Properties) are analyzed. As these results often contain significant distortions related to the atmospheric disturbances, selection of reliable test data implies the following requirement: large cloudless areas of the sea should contain no sudden chaotic spatial-temporal fluctuations of all the defined products and no false local correlations between the fields of the atmospheric and seawater parameters. Besides, imposed are the conditions for sufficiently accurate model reproduction of the empirical spectra of the sea surface reflectance and coincidence of the results obtained from the SeaWiFS and MODIS instruments. Application of the GIOP method permits to analyze the features of variations and the relative role of the light absorption components in the upper water layer associated with phytoplankton and the dissolved yellow substance. In the deep-water part of the Black Sea in summer, yellow substance makes the main contribution to absorption, and during the summer-autumn transition period, approximately equal growth of both the phytoplankton and the yellow substance absorptions is observed. Having been compared, the features of the Black Sea and the Equatorial Pacific waters are represented as an example. In contrast to the Black Sea, phytoplankton in the Equatorial Pacific is a decisive factor, whereas the yellow substance content remains almost unchanged.

**Keywords:** Black Sea, Pacific Ocean, satellite observations, spectral dependencies, optical characteristics, MODIS, SeaWiFS, GIOP, phytoplankton, yellow substance.

**Acknowledgements:** the authors express their thanks to the group of processing satellite information NASA GSFC (URL: <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>) for the opportunity to use empirical data. The investigation is carried out within the framework of the state task on the theme № 0827-2014-0011 “Investigation of regularities of the marine environment state changes based on the operational observations and the nowcast, forecast and reanalysis system data on the marine environment state” (code “Operational oceanography”).

**For citation:** Suetin, V.S. and Korolev, S.N., 2018. Estimating specific features of the optical properties' variability in the Black Sea waters using the data of satellite instruments SeaWiFS and MODIS. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*, [e-journal] 34(4), pp. 357-368. doi:10.22449/0233-7584-2018-4-357-368 (in Russian).

## Введение

Информация, получаемая с помощью работающих в космосе оптических приборов *SeaWiFS*, *MODIS* и других, может использоваться при контроле и изучении разнообразных процессов изменчивости состояния морских акваторий. Результаты регулярных глобальных космических наблюдений и продукты их обработки в оперативном режиме накапливаются в специальных архивах с обеспечением свободного доступа через Интернет. Установленная на спутнике аппаратура с высокой точностью регистрирует уходящее в космос излучение различных длин волн видимого диапазона спектра, которое сложным образом зависит от множества переменных параметров атмосферы и верхнего слоя моря. К их числу относятся показатели поглощения  $a(\lambda)$  и обратного рассеяния  $b_b(\lambda)$  света в воде ( $\lambda$  – длина волны излучения), концентрация хлорофилла  $a$ , оптическая толщина аэрозольной составляющей атмосферы и др.

Одно из направлений использования космических измерений состоит в определении числовых значений этих параметров. С этой целью могут применяться разные модели, методы и алгоритмы. Чаще всего используются удобные для проведения массовых расчетов упрощенные подходы, в которых в явной или неявной форме предполагается, что число независимых факторов, от которых зависят результаты спутниковых измерений, существенным образом ограничено. К таким методам относятся, например, описанные в работах [1–5]. Такие методы не способны обеспечить высокую эффективность при интерпретации данных наблюдений в широком разнообразии условий, меняющихся от региона к региону, в разные сезоны и т. п.

Известны также комплексные методы, предназначенные для более детального учета всех основных эффектов, проявляющихся в вариациях опти-

ческих свойств морской воды [6–8]. В последние годы применяемая в NASA операционная система обработки спутниковых данных дополнена процедурой, реализующей один из таких комплексных методов – *Generalized ocean color inversion model for retrieving marine inherent optical properties (GIOP)* [9]. Соответственно в число стандартных продуктов обработки включен более широкий набор параметров, содержащий кроме  $a(\lambda)$  и  $b_b(\lambda)$  еще и показатели поглощения света в море, обусловленные содержанием фитопланктона  $a_{ph}(\lambda)$  и желтого вещества  $a_{dg}(\lambda)$  (в комбинации с детритом). В архивы NASA были добавлены результаты применения *GIOP* для накопленных ранее массивов глобальных наблюдений за все время работы приборов *SeaWiFS* и *MODIS* в космосе.

В основе *GIOP* заложены физические модели, в параметрической форме описывающие зависимости оптических свойств моря от длины волны света и содержания в воде основных оптически активных примесей. Эти модели очевидным образом имеют более или менее приближенный характер. Поэтому требуется проверка работоспособности *GIOP* с учетом конкретных особенностей оптических свойств воды в Черном море. С этой целью полезно детально рассмотреть некоторые наиболее характерные примеры, отражающие специфические особенности вод Черного моря. Ранее подобные исследования были выполнены в [7, 10] на основе применения других методов. Отдельные результаты использования *GIOP* описаны в [11], но там рассматривалась несколько иная задача.

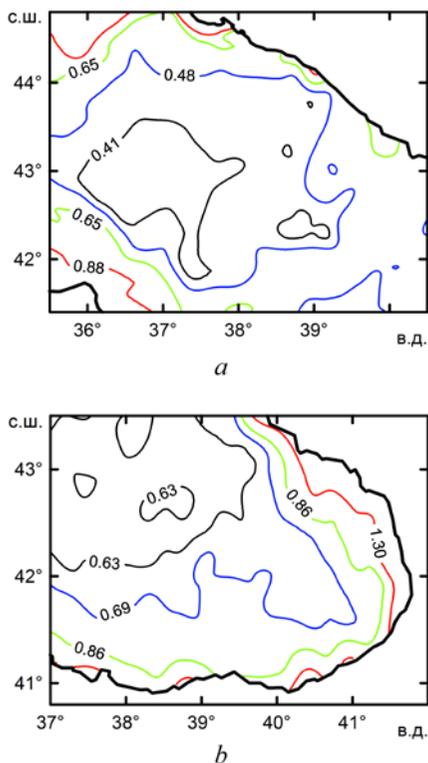
### Черное море

Исходными данными в расчетах характеристик морской воды методом *GIOP* служат спектральные коэффициенты яркости поверхности моря  $R_{rs}(\lambda)$  для всех измерительных каналов видимого диапазона, которые получаются на одном из первых этапов обработки результатов спутниковых наблюдений при устранении атмосферных помех. Как известно, для Черного моря результаты определения  $R_{rs}(\lambda)$  часто могут содержать значительные ошибки. Главная причина возникновения ошибок состоит в отличии оптических свойств реального атмосферного аэрозоля от тех моделей, которые заложены в созданную в NASA систему обработки данных глобальных спутниковых наблюдений. Кроме того, на точность определения  $R_{rs}(\lambda)$  оказывают влияние такие факторы, как солнечный блик, погрешности задания калибровочных параметров прибора, повышенная чувствительность датчиков к изменениям поляризации регистрируемого излучения и др.

Вследствие этого для получения надежных выводов необходимо избегать использования искаженных данных и приходится ограничиться анализом относительно небольшого числа примеров с наиболее достоверными исходными значениями  $R_{rs}(\lambda)$ . Для их отбора можно использовать критерии, применявшиеся ранее в [10–13]. При этом требуется, чтобы в пределах протяженных безоблачных участков моря не было резких хаотичных пространственно-временных флуктуаций всех определяемых параметров, 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 двух приборов – *SeaWiFS* и *MODIS*. Ниже приводятся результаты анализа тестовых данных, полученных с использованием этих критериев.

На рис. 1 показаны схематичные карты пространственного распределения концентрации хлорофилла  $a$  (которую будем обозначать через  $C_a$ ) 11.08.2006 г. и 4.10.2006 г. Здесь использованы содержащиеся в архиве *NASA* результаты расчетов  $C_a$  традиционным упрощенным методом [1] по данным прибора *MODIS*. Как известно, в Черном море этот метод может приводить к ошибкам, тем не менее приведенные на рис. 1 карты позволяют косвенным образом судить об оптических свойствах воды в эти дни.

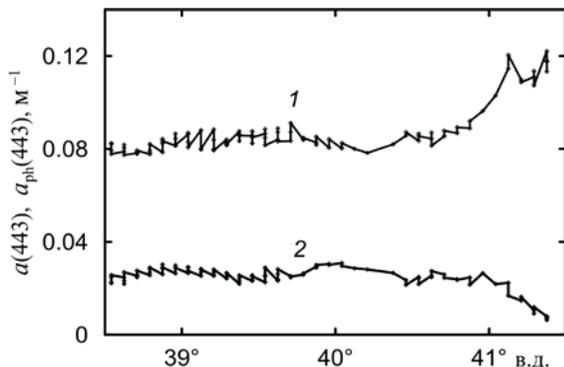


**Р и с. 1.** Карты пространственного распределения величины  $C_a$ ,  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , в восточной части Черного моря 11.08.2006 г. (a) и 4.10.2006 г. (b)

**Fig. 1.** Charts of spatial distribution of value  $C_a$ ,  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$  in the eastern Black Sea on 11.08.2006 (a) and 04.10.2006 (b)

В глубоководной части моря 4.10.2006 г. в пределах большой площади поле  $C_a$  было почти однородным, а на востоке при приближении к берегу происходил рост  $C_a$ . Существенно, что в этот день почти вся восточная часть Черного моря была свободна от облачности и обеспечена результатами практически одновременных съемок приборами *MODIS* и *SeaWiFS*. Для рассматриваемого ниже тестового участка разница по времени между данными двух приборов не превышает 20 мин.

На рис. 2 показаны значения параметров  $a(443)$ ,  $a_{ph}(443)$  методом *GIOP*, выделенные из полосы, расположенной около  $42,0^\circ$  с. ш. и имеющей ширину  $0,25^\circ$  по широте. При построении этих графиков использованы представленные в формате *Level-3m* результаты обработки полученных 4.10.2006 г. данных прибора *MODIS*.



**Р и с. 2.** Вариации параметров поглощения, полученных 4.10.2006 г., в пределах узкой полосы, расположенной около  $42,0^\circ$  с. ш.:  $a(443)$  – кривая 1,  $a_{ph}(443)$  – кривая 2  
**Fig. 2.** Variations of the absorption parameters obtained on 04.10.2006 within the narrow strip close to  $42.0^\circ$  N:  $a(443)$  is curve 1 and  $a_{ph}(443)$  is curve 2

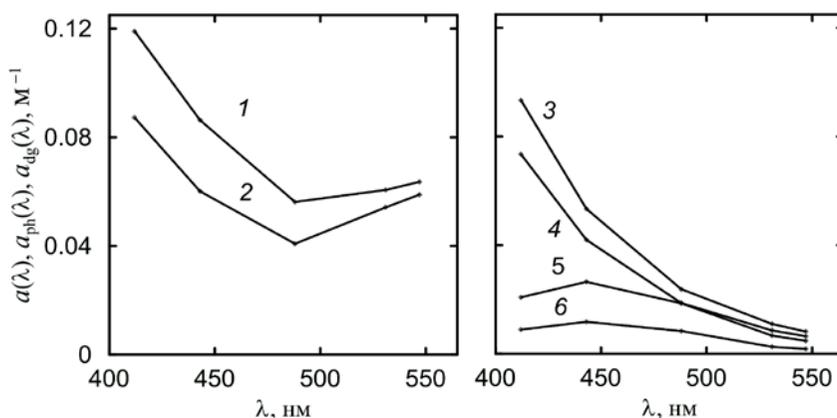
На рис. 2 на участке к западу от  $\sim 41^\circ$  в. д. величины  $a(443)$ ,  $a_{ph}(443)$  почти не меняются, но по мере приближения к берегу на востоке  $a(443)$  естественным образом увеличивается, а в результатах определения  $a_{ph}(443)$  проявляется существенное снижение. Приведенная на рис. 1 карта в этом же районе демонстрирует повышение концентрации хлорофилла  $a$ , и поэтому следовало ожидать также и увеличения  $a_{ph}(443)$ . Примечательно еще, что в данных *SeaWiFS* такого снижения  $a_{ph}(443)$  нет. Эти противоречия служат наглядным примером проявления искажений в результатах применения метода *GIOP*.

Аналогичные искажения часто встречаются при анализе продуктов обработки спутниковых данных с использованием подобных *GIOP* комплексных методов, имеющих целью одновременное определение многих неизвестных параметров морской воды на основе измерений в полном наборе спектральных каналов работающих в космосе приборов. В этом заключается общее свойство такого рода задач, состоящее в неоднозначности и неустойчивости их решений по отношению к разнообразным неточностям в модели и в исходных данных. Подробное изучение этой проблемы выходит за рамки данной работы, отдельные ее аспекты рассмотрены в [2, 8, 10, 14].

Использованные здесь и ниже данные формата *Level-3m* представляют собой приведенные к узлам регулярной координатной сетки итоговые продукты обработки, для которых выполнены все необходимые операции преобразований, включая автоматическую отбраковку плохо пригодных для использования отсчетов по ряду формальных критериев. Анализ приведенного на рис. 2 и многих других подобных примеров наблюдений Черного моря говорит о том, что при реализации метода *GIOP* такая отбраковка не в полной

мере исключает искаженные данные. Перечисленные выше критерии оказываются более эффективными. При этом, несмотря на то что в результатах наблюдений Черного моря приборами *MODIS* и *SeaWiFS* часто проявляются разнообразные серьезные искажения, остается возможность получения полезной информации путем тщательного отбора данных наблюдений в наиболее благоприятных ситуациях.

В рассматриваемом примере съемок восточной части Черного моря 4.10.2006 г. вполне благополучный участок расположен около  $39^\circ$  в. д. в пределах выборки данных, использованной на рис. 2. На рис. 3 и в табл. 1 приведены результаты применения *GIOP* к данным *MODIS* для одного из узлов сетки в этом участке. Здесь же показаны полученные аналогичным образом результаты обработки данных съемки Черного моря 11.08.2006 г.



**Р и с. 3.** Результаты определения спектральных характеристик поглощения методом *GIOP* по данным съемок Черного моря прибором *MODIS* 4.10.2006 г. (1, 3, 5) и 11.08.2006 г. (2, 4, 6): 1 и 2 –  $a(\lambda)$ ; 3 и 4 –  $a_{dg}(\lambda)$ ; 5 и 6 –  $a_{ph}(\lambda)$

**F i g. 3.** Results of determining the absorption spectral characteristics by the *GIOP* method based on the Black Sea surveys performed by the instrument *MODIS* on 04.10.2006 (1, 3, 5) and on 11.08.2006 (2, 4, 6): 1 and 2 are  $a(\lambda)$ ; 3 and 4 are  $a_{dg}(\lambda)$ ; 5 and 6 are  $a_{ph}(\lambda)$

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 с использованием метода *GIOP***  
**Results of determining the chlorophyll *a* concentration and the optical parameters of the Black Sea waters using the *GIOP* method**

Дата/Date	Координаты/ Coordinates		$a_{ph}(443), \text{M}^{-1}/$ $a_{ph}(443), \text{m}^{-1}$	$a_{dg}(443), \text{M}^{-1}/$ $a_{dg}(443), \text{m}^{-1}$	$C_a, \text{MГ}\cdot\text{M}^{-3}/$ $C_a, \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	$C_{ag}, \text{MГ}\cdot\text{M}^{-3}/$ $C_{ag}, \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$
	$^{\circ}\text{C. Ш.}/$ $^{\circ}\text{N}$	$^{\circ}\text{В. Д.}/$ $^{\circ}\text{E}$				
11.08.2006 г.	42,37	37,71	0,012	0,042	0,42	0,21
4.10.2006 г.	42,21	39,04	0,025	0,055	0,72	0,48

Приведенные на рис. 3 и в табл. 1 примеры удовлетворяют перечисленным выше критериям, в том числе выполняется условие совпадения результатов расчетов всех параметров и продуктов применения *GIOP* для двух приборов. Существенно также, что при этом заложенные в *GIOP* модельные представления с хорошей точностью обеспечивают воспроизведение эмпирических спектральных зависимостей коэффициента яркости морской поверхности  $R_{rs}(\lambda)$ .

Приведенные примеры интересны тем, что получены в один и тот же год в одном и том же районе моря и отражают обычные изменения оптических свойств от летнего сезона к осени. Несмотря на то что показанные на рис. 3 и в табл. 1 данные относятся к отсчетам в единичных узлах координатной сетки формата *Level-3m*, эти данные характеризуют свойства протяженных районов в глубоководной части Черного моря.

Результаты применения метода *GIOP* позволяют анализировать особенности вариаций и относительную роль составляющих, которые оказывают влияние на поглощение света в верхнем слое воды. При переходе от лета к осени в каждой из величин  $a_{ph}(\lambda)$  и  $a_{dg}(\lambda)$  наблюдается примерно одинаковое увеличение, но при этом относительные изменения  $a_{dg}(\lambda)$  оказываются менее выраженными, так как эта составляющая вносит основной вклад в общий уровень поглощения. Последнее обстоятельство служит одним из ключевых источников ошибок определения  $C_a$  в Черном море по спутниковым измерениям.

Следует отметить, что близкие по смыслу выводы сформулированы ранее в [7, 15–17] на основе анализа натуральных данных и в работах [2, 10] – при интерпретации спутниковых наблюдений. Полученные нами новые результаты содержат более детальный анализ ключевых эффектов и интересны тем, что характеризуют конкретные примеры применения метода *GIOP*.

Согласно [18], в водах открытой части Черного моря поглощение света детритом существенно меньше, чем  $a_{ph}(\lambda)$ , поэтому можно считать, что основную роль играет желтое вещество, и в рассматриваемых нами ситуациях в обозначении  $a_{dg}(\lambda)$  детрит фигурирует только для того, чтобы точно следовать системе обозначений, принятой в описании метода *GIOP* [9].

Кроме оценки концентрации хлорофилла  $a$ , вычисленной традиционным упрощенным способом [1], в табл. 1 приведены еще и результаты ее расчетов методом *GIOP*, обозначенных как  $C_{ag}$ . Обе эти величины определены по данным космических съемок прибором *MODIS*. Легко видеть, что  $C_a$  превышает  $C_{ag}$  примерно в полтора – два раза. Это отличие является прямым следствием специфики оптических свойств воды в Черном море. Ранее уже было установлено, что упрощенный способ [1] часто завышает  $C_a$  в Черном море [2, 19, 20], поэтому можно считать, что результаты расчетов методом *GIOP* ближе к реальности.

Об этом же говорит и тот факт, что применение специально предложенного в [2] регионального алгоритма для Черного моря по измерениям 11.08.2006 г. и 4.10.2006 г. приводит к близким к  $C_{ag}$  оценкам концентрации хлорофилла  $a$ : 0,26 и 0,41 мг·м<sup>-3</sup>. Кроме того, полученное для 11.08.2006 г. значение  $C_{ag}$  вполне согласуется с обычными условиями в это время года

в глубоководной части Черного моря. Для 4.10.2006 г. определенные по спутниковым измерениям  $C_{ag}$  и соответствующие  $R_{rs}(\lambda)$  близки к описанным в [7] результатам *in situ* измерений, выполненных 14.09.2000 г. на одной из станций в ходе экспедиции в северо-восточном районе моря.

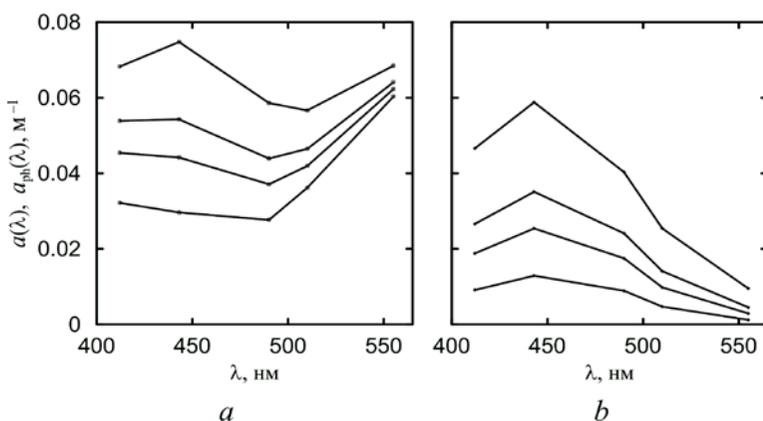
### Тихий океан

Чтобы яснее понимать возможности метода *GIOP* и оценить особенности оптических свойств воды в Черном море, полезно сравнить их со свойствами вод других акваторий. С этой целью в табл. 2 и на рис. 4 приведены примеры продуктов обработки данных прибора *SeaWiFS*, специальным образом выбранные из съемок экваториальной области Тихого океана, выполненных 29.05.2003 г. и 13.06.2010 г. Здесь так же, как и для Черного моря, использованы результаты применения метода *GIOP*, представленные в архиве *NASA* в формате *Level-3m*. Под отрицательными значениями северной широты в табл. 2 подразумеваются соответствующие значения южной широты.

Т а б л и ц а 2  
T a b l e 2

Результаты определения оптических параметров воды  
в Тихом океане с использованием метода *GIOP*  
Results of determining the Pacific Ocean water optical parameters using  
the *GIOP* method

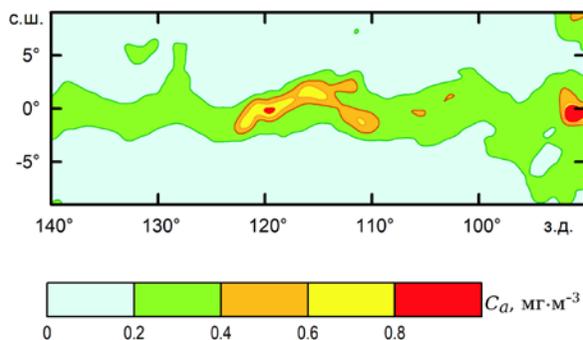
Дата/Date	Координаты/ Coordinates		$a_{ph}(443), \text{M}^{-1}/$	$a_{dg}(443), \text{M}^{-1}/$	$C_a, \text{мг}\cdot\text{м}^{-3}/$
	°с. ш./°N	°з. д./°W	$a_{ph}(443), \text{m}^{-1}$	$a_{dg}(443), \text{m}^{-1}$	$C_a, \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$
13.06.2010 г.	0,79	135,54	0,046	0,013	0,62
	2,46	135,54	0,015	0,010	0,18
29.05.2003 г.	-1,71	115,29	0,013	0,010	0,16
	-0,71	115,29	0,025	0,012	0,29
	0,87	115,29	0,035	0,013	0,45
	1,12	115,29	0,059	0,010	0,84



Р и с. 4. Результаты определения спектральных зависимостей величин  $a(\lambda)$  – (a) и  $a_{ph}(\lambda)$  – (b) по данным съемки Тихого океана прибором *SeaWiFS* 29.05.2003 г.

F i g. 4. Results of determining spectral dependencies of the values  $a(\lambda)$  – (a) and  $a_{ph}(\lambda)$  – (b) based on the Black Sea surveys performed by the instrument *SeaWiFS* on 29.05.2003

В рассматриваемом районе Тихого океана наблюдается связанное с феноменом Эль-Ниньо – Южное колебание интересное явление, которое сопровождается эпизодическим повышением содержания хлорофилла  $a$  и снижением прозрачности воды в узкой полосе у экватора [21, 22]. На рис. 5 схематически показана относящаяся к периоду 25 мая – 1 июня 2003 г. композиционная карта пространственного распределения концентрации хлорофилла  $a$  в экваториальной зоне Тихого океана, построенная по содержащимся в архиве NASA результатам обработки спутниковых измерений традиционным методом [1].

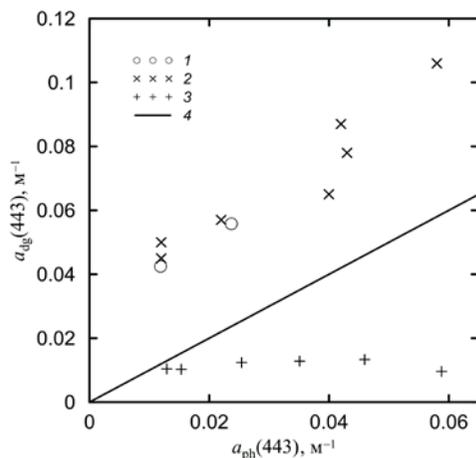


**Рис. 5.** Композиционная карта распределения  $C_a$  в экваториальной зоне Тихого океана по данным спутниковых измерений в период 25 мая – 1 июня 2003 г.

**Fig. 5.** Compositional chart of  $C_a$  distribution in the equatorial Pacific Ocean based on the satellite measurements obtained from May 25, 2003 to June 1, 2003

По уровням показателя поглощения света и  $C_a$  приведенные в табл. 2 и на рис. 4 примеры хорошо соотносятся с рассмотренными выше для Черного моря. Их сопоставление свидетельствует о существенном различии в закономерностях формирования оптических свойств воды в Черном море и Тихом океане. Главное отличие состоит в том, что значения  $a_{dg}(443)$  из табл. 2 имеют относительно низкий уровень и почти не меняются, а соответствующие вариации  $a(443)$  почти полностью обусловлены вариациями  $a_{ph}(443)$ . При этом спектры  $a(\lambda)$  в Черном море и в океане имеют разную форму.

В наглядном виде соотношение между величинами  $a_{ph}(443)$  и  $a_{dg}(443)$  в Черном море и в выделенном нами районе Тихого океана показано на рис. 6. На этом рисунке кроме описанных выше новых данных дополнительно нанесены результаты определения  $a_{ph}(443)$  и  $a_{dg}(443)$ , представленные в работах [10, 11]. В [11] использованы величины  $a_{ph}(443)$  и  $a_{dg}(443)$  из архива NASA (полученные с помощью *GIOP*), в [10] они были вычислены несколько иным близким по смыслу методом. При этом для одной точки в качестве исходных были взяты приведенные в работе [7] результаты измерений  $R_{rs}(\lambda)$ , выполненных 14.09.2000 г. на упомянутой выше станции в ходе экспедиции в северо-восточной части Черного моря плавающим на поверхности воды спектро радиометром, а для четырех других точек в расчетах использованы спектры  $R_{rs}(\lambda)$ , определенные по данным *SeaWiFS*.



**Р и с. 6.** Соотношение между величинами  $a_{ph}(443)$  и  $a_{dg}(443)$ : 1 – Черное море 11.08.2006 г. и 4.10.2006 г.; 2 – Черное море по данным из работ [10, с. 82; 11, с. 59]; 3 – Тихий океан 29.05.2003 г. и 13.06.2010 г.; 4 – прямая линия  $a_{dg}(443) = a_{ph}(443)$

**F i g. 6.** Ratio between the values  $a_{ph}(443)$  and  $a_{dg}(443)$ : 1 is the Black Sea on 11.08.2006 and on 4.10.2006; 2 is the Black Sea based on the data from [ 10, p. 82; 11, p. 59]; 3 is the Pacific Ocean on 29.05.2003 and on 13.06.2010; 4 is the straight line  $a_{dg}(443) = a_{ph}(443)$

На рис. 6 в каждой из двух групп точек, относящихся к разным акваториям, проявляются единообразные, но значительно отличающиеся тенденции. Интересно также, что описанные выше полученные через *GIOP* новые данные для Черного моря хорошо согласуются с определенными ранее в работах [10, 11]. Таким образом, если рассматривать вместе результаты применения *GIOP* для обработки спутниковых съемок Черного моря и Тихого океана, то можно отчетливо увидеть проявления независимой изменчивости составляющих поглощения света  $a_{ph}(\lambda)$  и  $a_{dg}(\lambda)$ . Это обстоятельство играет важную роль при изучении оптических свойств морской воды, определении биопродуктивности и т. п. Если же ограничиться только приведенными на рис. 6 данными для Черного моря, то можно предположить, что между  $a_{ph}(\lambda)$  и  $a_{dg}(\lambda)$  имеет место более или менее устойчивая корреляционная зависимость, однако для ее уверенного обоснования требуется проведение более обстоятельного исследования, выходящего за рамки настоящей работы.

### Заключение

Выполненный анализ позволяет лучше понять принципиальные возможности количественной интерпретации спутниковых данных в терминах спектральных зависимостей оптически активных компонент морской воды. Несмотря на то что в результатах наблюдений Черного моря приборами *MODIS* и *SeaWiFS* часто проявляются серьезные искажения, аккуратный отбор содержащихся в архивах *NASA* наиболее достоверных данных обеспечивает получение полезной информации об оптических свойствах верхнего слоя воды.

В рассмотренных нами примерах спектральные зависимости коэффициента яркости морской поверхности с хорошей точностью воспроизводятся моделью *GIOP*, использованной при проведении операционной обработки накапливаемых спутниковых измерений. Результаты сопоставления влияния

растворенного в воде желтого вещества и фитопланктона на общее поглощение света в различных участках спектра отражают региональные особенности Черного моря и экваториальной области Тихого океана. В Черном море существенный вклад вносит составляющая  $a_{dg}$ , тогда как в экваториальной зоне Тихого океана  $a_{dg}$  играет слабую роль.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS / J. E. O'Reilly [et al.] // *Journal of Geophysical Research*. 1998. Vol. 103, iss. C11. P. 24937–24953. <https://doi.org/10.1029/98JC02160>
2. Analysis of the 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, iss. 6. P. 331–340. doi:10.1023/A:1021729229168
3. Копелевич О. В., Буренков В. И., Шеберстов С. В. Разработка и использование региональных алгоритмов для расчета биооптических характеристик морей России по данным спутниковых сканеров цвета // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2006. Т. 3, № 2. С. 99–105. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15610279> (дата обращения: 01.11.2017).
4. Электронный атлас «Биооптические характеристики морей России по данным спутниковых сканеров цвета 1998–2014 гг.» / О. В. Копелевич [и др.] // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2015. Т. 12, № 6. С. 99–110. URL: [http://d33.infospace.ru/d33\\_conf/sb2015t6/99-110.pdf](http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2015t6/99-110.pdf) (дата обращения: 01.11.2017).
5. Cota G. F., Wang J., Comiso J. C. Transformation of global satellite chlorophyll retrievals with a regionally tuned algorithm // *Remote Sensing of Environment*. 2004. Vol. 90, iss. 3. P. 373–377. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.01.005>
6. Tassan S. Local algorithms using *SeaWiFS* data for the retrieval of phytoplankton, pigments, suspended sediment, and yellow substance in coastal waters // *Applied Optics*. 1994. Vol. 33, iss. 12. P. 2369–2378. <https://doi.org/10.1364/AO.33.002369>
7. Оптический мониторинг биологического и экологического состояния Черного моря / В. И. Буренков [и др.] // *Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря* / Под ред. А. Г. Зацепина, М. Ф. Флинта. М. : Наука, 2002. С. 417–436.
8. Remote sensing of inherent optical properties: fundamentals, tests of algorithms, and applications / Z. P. Lee (ed.). Canada, Dartmouth : IOCCG, 2006. 126 p. (Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No. 5). URL: <http://ioccg.org/reports/report5.pdf> (дата обращения: 01.11.2017).
9. 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>
10. 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. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/105132> (дата обращения 01.11.2017).
11. Суетин В. С., Королев С. Н., Кучерявый А. А. Проявление эффектов солнечного блика при определении оптических параметров воды в Черном море по спутниковым измерениям // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 3. С. 52–62. URL: [http://мгфж.рф/images/files/2016/03/201603\\_05.pdf](http://мгфж.рф/images/files/2016/03/201603_05.pdf) (дата обращения: 01.11.2017).
12. Сравнительный анализ методов определения оптических параметров Черного моря по данным спутниковых измерений / В. С. Суетин [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2011. № 2. С. 33–42. URL: [http://мгфж.рф/images/files/2011/02/201102\\_04.pdf](http://мгфж.рф/images/files/2011/02/201102_04.pdf) (дата обращения: 01.11.2017).
13. Оптические свойства аэрозолей и атмосферная коррекция спутниковых наблюдений Черного моря / В. С. Суетин [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2013. № 1. С. 34–44. URL: <http://мгфж.рф/index.php/repository?id=173> (дата обращения: 01.11.2017).

14. Uniqueness in remote sensing of the inherent optical properties of ocean water / M. Sydor [et al.] // *Applied Optics*. 2004. Vol. 43, iss. 10. P. 2156–2162. <https://doi.org/10.1364/AO.43.002156>
15. Чурилова Т. Я., Суслин В. В., Сосик Х. М. Спектральная модель подводной облученности в Черном море // *Морской гидрофизический журнал*. 2009. № 6. С. 33–46. URL: [http://мрфж.рф/images/files/2009/06/200906\\_03.pdf](http://мрфж.рф/images/files/2009/06/200906_03.pdf) (дата обращения: 01.11.2017).
16. 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* / P. Malanotte-Rizzoli, V. N. Eremeev (eds.). Dordrecht : Springer Science+Business Media, 1999. P. 313–326. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-4796-5\\_21](https://doi.org/10.1007/978-94-011-4796-5_21)
17. 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. Organelly [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2017. Vol. 122, iss. 5. P. 3543–3564. <http://dx.doi.org/10.1002/2016JC012629>
18. Чурилова Т. Я., Суслин В. В., Рылькова О. А. Параметризация поглощения света основными оптически активными компонентами в Черном море // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Вып. 16. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. С. 190–201. URL: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_29453023\\_13707559.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_29453023_13707559.pdf) (дата обращения: 1.11.2017).
19. 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. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2003.10.009>
20. Gregg W. W., Casey N. W. Global and regional evaluation of the SeaWiFS chlorophyll data set // *Remote Sensing of Environment*. 2004. Vol. 93, iss. 4. P. 463–479. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.12.012>
21. Biological and chemical response of the Equatorial Pacific Ocean to the 1997-98 El Niño / F. P. Chavez [et al.] // *Science*. 1999. Vol. 286, iss. 5447. P. 2126–2131. <https://doi.org/10.1126/science.286.5447.2126>
22. Why ocean colour? The societal benefits of ocean-colour technology / T. Platt, N. Hoepffner, V. Stuart, C. Brown (eds.). Canada, Dartmouth: IOCCG, 2008. 141 p. (Reports and Monographs of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No. 7). URL: <http://ioccg.org/wp-content/uploads/2016/02/report7.pdf> (дата обращения 01.11.2017).

Об авторах:

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

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