

УДК 551.463

Е.Н. Корчемкина, М.Е. Ли

Аномальные оптические характеристики вод Черного моря в июле 2012 года и их связь с концентрацией минеральной взвеси в воде

Рассматриваются результаты натурных измерений коэффициента яркости моря в июле 2012 г. Определены биооптические характеристики морской воды во время цветения кокколитофорид. С использованием разработанного ранее аналитического алгоритма рассчитаны концентрации пигментов фитопланктона и минеральной взвеси. Полученное содержание взвеси составляет в среднем $1,2 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Сделан вывод, что наблюдавшееся цветение являлось одним из самых массовых за последние годы.

Ключевые слова: кокколитофориды, коэффициент яркости, хлорофилл, аналитический алгоритм.

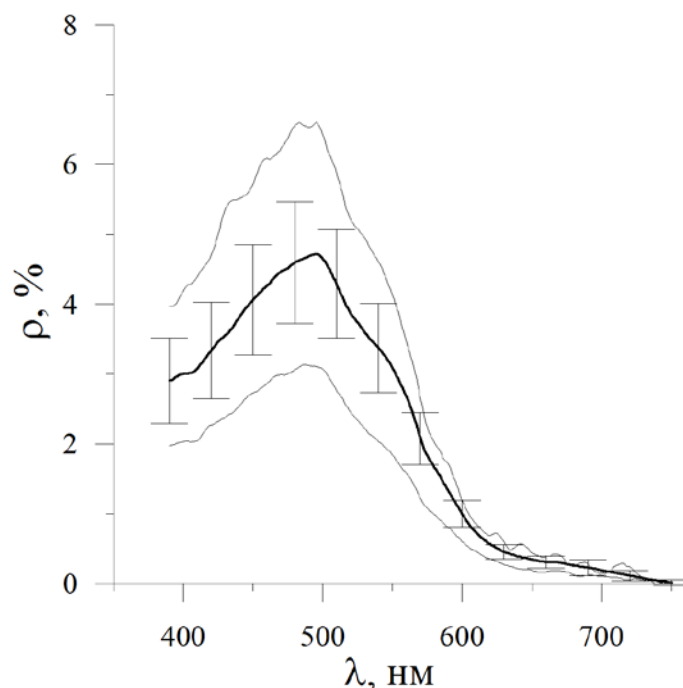
В рамках работ по проекту «Фундаментальная океанология» и по проекту NATO ESP.EAP.SFPP 982678 “Bio-Optical Characterization of the Black Sea for Remote Sensing Applications“ от 12 декабря 2008 г. отделом оптики МГИ НАН Украины с 9 по 19 июля 2012 г. были выполнены экспедиционные работы на океанографической платформе (Экспериментальное отделение МГИ, пос. Кацевели) по изучению оптических характеристик морской воды и атмосферы. Основной целью этих работ являлся сбор натурных данных об оптических характеристиках вод Черного моря и атмосферы над ним, а также совершенствование методов измерений и интерпретации оптических и микрофизических параметров гидро- и аэрозолей. Задачей эксперимента было наблюдение сильнейшего за последние годы цветения кокколитофорид и исследование его влияния на оптические параметры морской воды, валидация стандартных и региональных алгоритмов обработки спутниковых измерений сканерами *MERIS* и *MODIS* в условиях цветения кокколитофорид.

Кокколитофориды *Emiliania huxleyi* представляют собой одноклеточные водоросли с размером клеток 5 – 8 мкм, на поверхности каждой клетки находятся известковые диски (кокколиты) размером 1 – 2 мкм [1]. В Черном море *Emiliania huxleyi* составляют 90 – 99% от общей численности кокколитофорид [2]. В процессе жизнедеятельности клетка несколько раз сбрасывает кокколиты, что приводит к многократному возрастанию количества крупной минеральной взвеси в воде и, как следствие, – к увеличению рассеяния света без существенного увеличения поглощения. Слабая спектральная селективность рассеяния на крупных частицах приводит к тому, что вода приобретает характерный белесый оттенок, по которому цветение

© Е.Н. Корчемкина, М.Е. Ли, 2014

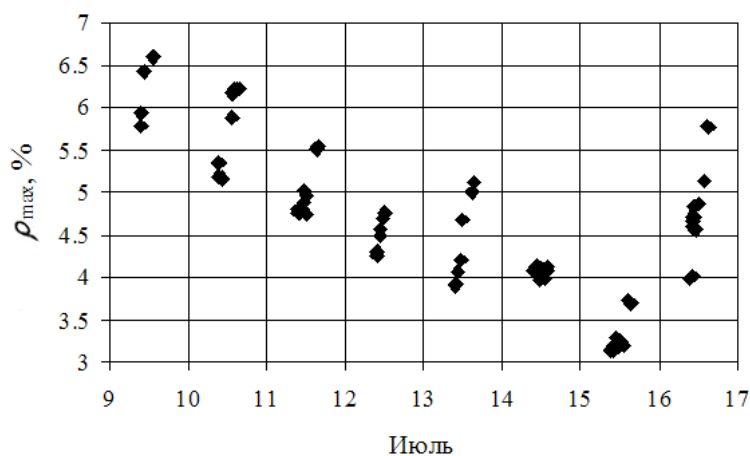
кокколитофорид можно обнаружить визуально. Рост же рассеяния назад приводит к увеличению восходящей яркости моря и коэффициента яркости, который измерялся в данном эксперименте. Возрастание восходящей яркости в июне 2012 г. оказалось настолько сильным, что автоматические программы обработки спутниковых данных распознавали район цветения как облачность, что показало необходимость проведения контактных измерений яркости моря. Стоит отметить, что, хотя биологические и биохимические исследования черноморских кокколитофорид проводятся в большом количестве, существующей информации об оптических свойствах взвеси кокколитов в воде недостаточно и она имеет скорее качественный характер [1, 3, 4].

Для проведения измерений коэффициента яркости применялся сконструированный в отделе оптики моря спектрофотометр [5] со спектральным диапазоном 390 – 720 нм, шаг измерений 5 нм. Предварительный анализ полученных распределений спектрального коэффициента яркости показал, что спектры имеют форму, характерную для вод Черного моря, с явно выраженным максимумом на длине волны ~ 490 нм. Значения в максимуме завышены в 3 – 4 раза по сравнению с характерными для данного сезона и составляют 3,13 – 6,60%, что объясняется влиянием цветения кокколитофорид. Спектр с максимальными значениями в максимуме $\rho_{\max} = 6,60\%$ на длине волны $\lambda = 495$ нм зафиксирован 9 июля, а с минимальными значениями $\rho_{\min} = 3,13\%$ на длине волны 486 нм – 15 июля. На рис. 1 приведены результаты количественного анализа изменчивости спектрального коэффициента яркости.



Р и с. 1. Изменчивость спектрального коэффициента яркости по данным всех измерений

Значения коэффициента яркости снижались в течение эксперимента, как показано на рис. 2, что объясняется осаждением кокколитов. Однако сильное нагонное течение с юга, наблюдавшееся 16 июля, привело к скачкообразному возрастанию коэффициента яркости в течение 20 мин, что можно объяснить повышенным содержанием взвеси в нагонной воде.



Р и с. 2. Временной ход максимальных значений коэффициента яркости

Данные по коэффициенту яркости были обработаны с использованием полуаналитического алгоритма, подробно изложенного в [6]. Спектр коэффициента яркости, согласно [6], описывается формулой

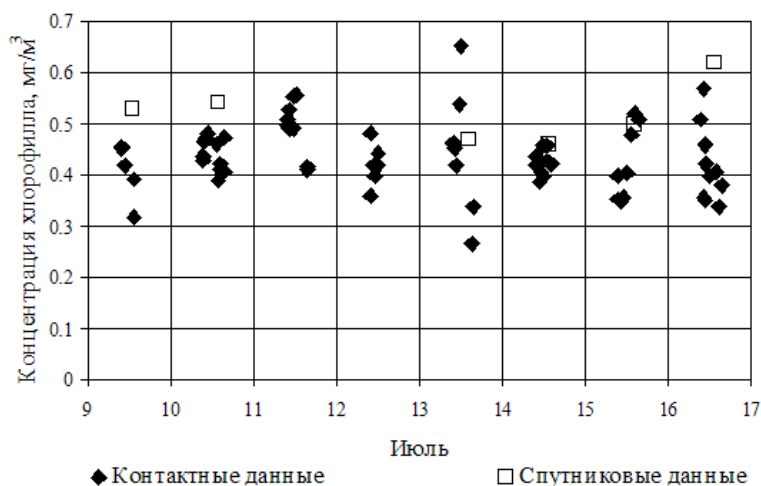
$$\rho(\lambda) = k \frac{b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda_0)(\lambda_0/\lambda)^\nu}{a_w(\lambda) + C_{chl}a_{chl}^*(\lambda) + C_{ddm}e^{-\alpha(\lambda-\lambda_0)}},$$

где $k = 0,15$; $b_{bw}(\lambda)$ – показатель обратного рассеяния чистой воды; $a_w(\lambda)$ – показатель поглощения чистой воды; $a_{chl}^*(\lambda)$ – спектр удельного поглощения пигментов фитопланктона. Параметры модели: $b_{bp}(\lambda_0)$ – показатель обратного рассеяния частиц взвеси на длине волны $\lambda_0 = 400$ нм, концентрация пигментов фитопланктона C_{chl} и поглощение неживой органикой C_{ddm} – рассчитываются методом оптимизации, каждый в своем спектральном участке. Используются участки спектра 390 – 410 нм для поглощения неживой органикой, 420 – 460 нм – для концентрации хлорофилла и 460 – 650 нм – для рассеяния взвесью. При обработке данных 2012 г. предполагалось, что спектральный ход рассеяния должен соответствовать крупной взвеси (размером более 1 мкм), поэтому, согласно [7], выбрано значение параметра $\nu = 0,8$.

Поскольку в модели не проводится разделение взвеси на крупную и мелкую фракции, $b_{bp}(\lambda_0)$ будет определять рассеяние всеми взвешенными минеральными частицами независимо от размера, то есть кокколитами, клетками кокколитофорида, минеральной взвесью иного происхождения. Однако при наблюдающейся

ситуации цветения численность кокколитов на порядок выше численности иной минеральной взвеси и на два порядка – численности клеток кокколитофорид [3].

Наибольший интерес представляли концентрация хлорофилла и обратное рассеяние взвесью. На рис. 3 приведен временной ход расчетных значений C_{chl} в сравнении со спутниковыми данными по концентрации хлорофилла (осредненными по нескольким пикселям, район океанографической платформы). Видно, что цветение кокколитофорид не приводит к существенному росту поглощения пигментами фитопланктона, так как частицы хлорофилла в клетках, покрытых непрозрачной оболочкой, не оказывают влияния на оптические характеристики морской воды.



Р и с. 3. Временная изменчивость концентрации пигментов фитопланктона

Оценить масштабы цветения и численность кокколитофорид можно по результатам расчета обратного рассеяния взвесью. Для того чтобы воспользоваться эмпирическим соотношением

$$b_{b_cocc}(546) = 1,1 \cdot 10^{-13} N_{cocc},$$

связывающим обратное рассеяние взвесью (кокколитами) $b_{b_cocc}(546)$ на длине волны 546 нм и численную концентрацию кокколитов N_{cocc} (m^{-3}) [7], полученное по результатам модельных расчетов обратное рассеяние $b_{bp}(400)$ было пересчитано для длины волны 546 нм с учетом спектрального хода:

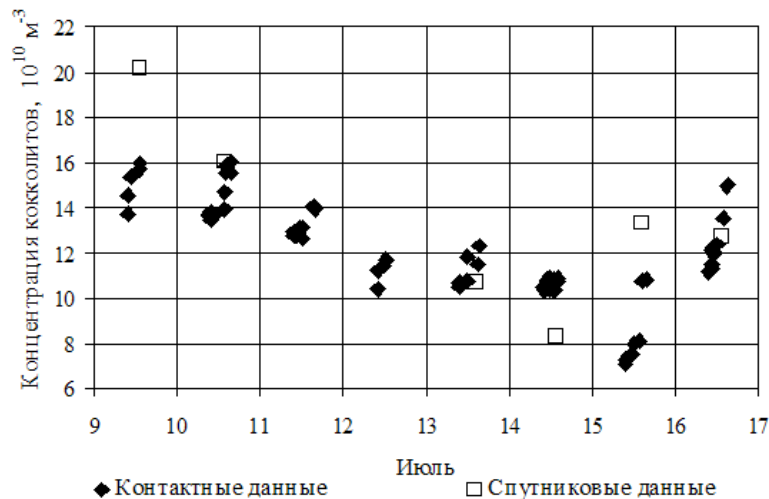
$$b_{b_cocc}(546) = b_{bp}(400) \left(\frac{400}{546} \right)^{0,8}.$$

Одновременно делалась оценка концентрации кокколитов по спутниковым данным, а именно по содержанию углерода в минеральной взвеси (*particulate inorganic carbon*, *pic*, моль(C)/ m^3), которое является одним из стандартных продуктов сканера *MODIS*. Данные *pic* были пересчитаны в концентрацию кокколитов с помощью соотношения

$$pic \cdot \mu(C) = m_{C_coccc} N_{coccc},$$

где $\mu(C)$ – молярная масса углерода; $m_{C_coccc} = 2 \cdot 10^{-13}$ г – содержание углерода в кокколите по данным [3].

Временной ход величин N_{coccc} , полученных по таким оценкам, приведен на рис. 4. В среднем значение концентрации составляло $1,2 \cdot 10^{11}$ м⁻³ с тенденцией к снижению. Это снижение четко коррелирует с уменьшением значений коэффициента яркости, о котором упоминалось выше. Полученные концентрации кокколитов, так же как и завышенные в 3 – 4 раза коэффициенты яркости, указывают на то, что наблюдавшееся цветение было одним из самых массовых за последние годы [2].



Р и с. 4. Временная изменчивость концентрации минеральной взвеси

Выводы. В июне – июле 2012 г. в Черном море наблюдалось массовое цветение кокколитофорид *Emiliana huxleyi*. В период измерений (9 – 16 июля) отмечено значительное изменение биооптических параметров по сравнению с характерными для исследуемого сезона:

- значения коэффициента яркости достигали 3,2 – 6,6% в максимуме при характерных 1 – 1,5%;

- концентрация хлорофилла, рассчитанная аналитическим методом по спектрам коэффициента яркости, составляла $\sim 0,5$ мг/м³, что превышает средние значения для летнего периода [8]. Причина такого повышения заключается в массовом развитии других видов фитопланктона наряду с кокколитофоридами;

- расчетная концентрация минеральной взвеси составляла $\sim 1,2 \cdot 10^{11}$ м⁻³, что по порядку величин соответствует цветениям, зафиксированным в 1992 и 2006 гг. [2].

Полученные концентрации хорошо коррелируют со спутниковыми оценками тех же параметров.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Balch W.M., Kilpatrick A.K., Holligan P.M. et al.* The 1991 coccolithophore bloom in the central North Atlantic. II. Relating optics to coccolith concentration // *Limnol. Oceanogr.* – 1996. – 41. – P. 1684 – 1696.
2. *Микаэлян А.С., Силкин В.А., Паутова Л.А.* Развитие кокколитофорид в Черном море: межгодовые и многолетние изменения // *Океанология.* – 2011. – 51, № 1. – С. 45 – 53.
3. *Balch W.M., Holligan P.M., Ackleson S.G. et al.* Biological and optical properties of mesoscale coccolithophore blooms in the Gulf of Maine // *Limnol. Oceanogr.* – 1991. – 36. – P. 629 – 643.
4. *Balch W.M., Kilpatrick A.K., Trees C.C.* The 1991 coccolithophore bloom in the central North Atlantic. I. Optical properties and factors affecting their distribution // *Ibid.* – 1996. – 41. – P. 1669 – 1683.
5. *Лу М.Е., Мартынов О.В.* Измеритель коэффициента яркости для подспутниковых измерений биооптических параметров вод // *Экологическая безопасность прибрежных и шельфовых зон и комплексное использование ресурсов шельфа.* – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2000. – С. 9 – 17.
6. *Korchemkina E.N., Shybanov E.B., Lee M.E.* Regional analytical algorithm of seawater constituents concentrations retrieving from sea reflectance // *Proceedings of IV International Conference “Current problems in optics of natural waters”.* – Nizhny Novgorod: Institute of Applied Physics RAS, 2007. – P. 166 – 170.
7. *Маньковский В.И., Владимиров В.Л., Афонин В.И. и др.* Многолетняя изменчивость прозрачности воды в Черном море и факторы, обусловившие ее сильное снижение в конце 80-х – начале 90-х годов. – Севастополь, 1996. – 32 с. – (Препринт / НАН Украины. Морской гидрофизический институт).
8. <http://blackseacolor.com>.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь
E-mail: ekorchemkina@gmail.com

Материал поступил
в редакцию 08.10.12
После доработки 19.10.12

АНОТАЦІЯ Розглядаються результати натурних вимірювань коефіцієнта яскравості моря в липні 2012 р. Визначені біооптичні характеристики морської води під час цвітіння кокколитофорид. З використанням розробленого раніше аналітичного алгоритму розраховано концентрації пігментів фітопланктону і мінеральної суспензії. Отриманий вміст суспензії становить в середньому $1,2 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Зроблено висновок, що цвітіння, яке спостерігалось, було одним з наймасовіших за останні роки.

Ключові слова: кокколитофориди, коефіцієнт яскравості, хлорофіл, аналітичний алгоритм.

ABSTRACT Results of *in situ* measurements of sea reflectance in July, 2012 are considered. Bio-optical characteristics of seawater during coccolithophore bloom are defined. Concentrations of phytoplankton pigments and mineral suspension are calculated using the previously developed analytical algorithm. The obtained particle concentration is $1.2 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-3}$. It is concluded that the observed bloom is one of the most intense in recent years.

Keywords: coccolithophores, sea reflectance, chlorophyll, analytical algorithm.