УДК 551.463

© *Е. Н. Корчемкина, М. Е. Ли*
Морской гидрофизический институт, Севастополь
ekorchemkina@gmail.com

АНОМАЛЬНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИБРЕЖНЫХ ВОД ЧЕРНОГО МОРЯ В ИЮЛЕ 2012 ГОДА И ИХ СВЯЗЬ С КОНЦЕНТРАЦИЕЙ МИНЕРАЛЬНОЙ ВЗВЕСИ В ВОДЕ

Период мая—июля 2012 года характеризовался массовым развитием в водах Черного моря одноклеточных водорослей Emiliania huxleyi (кокколитофорид), что привело к возрастанию восходящей яркости вследствие рассеяния света на минеральной взвеси, которая является продуктом жизнедеятельности данного вида водорослей. Увеличение яркости моря оказалось настолько сильным, что автоматические программы обработки спутниковых данных распознавали район цветения как облачность, что показало необходимость проведения контактных измерений яркости моря. Целью работы было исследование биооптических характеристик морской воды во время цветения кокколитофорид для дальнейшего применения к дистанционному зондированию. В статье рассматриваются результаты натурных измерений спектрального коэффициента яркости моря в июле 2012 г. Измерения зафиксировали значения коэффициента яркости моря, завышенные в 3—4 раза по сравнению с характерными для данного сезона, однако форма спектров оставалась практически неизменной. С использованием разработанного ранее аналитического алгоритма рассчитаны концентрации пигментов фитопланктона и минеральной взвеси (кокколитов). Полученное содержание взвеси составляет в среднем $1.2 \cdot 10^{11}$ м$^{-3}$. Сделан вывод, что наблюдавшееся цветение являлось одним из самых массовых за последние годы.

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

E. N. Korchemkina, M. E. Lee
Marine Hydrophysical Institute, Sevastopol, Russia

ANOMALOUS OPTICAL PROPERTIES OF THE BLACK SEA IN JULY 2012 AND RELATIONSHIP WITH THE CONCENTRATION OF MINERAL SUSPENSION IN THE WATER

In May—July 2012 a massive bloom of algae Emiliania huxleyi (coccolithophores) was observed in the Black Sea, inducing an increase in the upwelling radiance due to light scattering on the mineral particles, produced by algae cells. Such a strong increase of the brightness of the sea led to the fact that the automatic program of satellite data processing recognized the bloom area as clouds, showing the need for contact measurements. The aim was to study the biooptical characteristics of seawater during the coccolithophores blooming for further applications to remote sensing. The article discusses the results of field measurements of the spectral reflectance of the sea in July 2012. The measurements recorded reflectance values increased 3—4 times compared with the seasonal average, but the shape of reflectance spectra has remained unchanged. Using a previously developed analytical algorithm, concentrations of phytoplankton pigments and mineral particles (coccoliths) were calculated. Obtained particles concentration was $1.2 \cdot 10^{11}$ m^{-3} in average. It is concluded that the observed bloom was one of the most intense in recent years.

Key words: coccolithophores, reflectance, chlorophyll, analytical algorithm.

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. Кацивели) 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 [1] и исследование его влияния на оптические параметры морской воды.

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 [2]. В Черном море *Emiliania huxleyi* составляют 90—99 % от общей численности кокколитофорид [3]. 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 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 (рис. 1, см. вклейку). Стоит отметить, что, хотя биологические и биохимические исследования кокколитофорид проводятся в большом количестве [2, 4—6], существующей информации об оптических свойствах взвеси кокколитов в черноморских водах недостаточно, и она имеет скорее качественный характер.

Одной из наиболее информативных оптических характеристик морской воды является спектральный коэффициент яркости моря, который определяется как отношение яркости диффузного излучения, выходящего из моря, к яркости идеального диффузно отражающего экрана, находящегося в воздухе и освещенного излучением, падающим на поверхность моря.

Для проведения измерений коэффициента яркости применялся сконструированный в отделе оптики моря спектрофотометр [7] со спектральным диапазоном 390—720 нм, шаг измерений 5 нм, погрешность измерений 3 %. В нем предусмотрена возможность измерения углового распределения спектральной яркости восходящего излучения моря или яркости небосвода, нормированных на спектральную облученность поверхности моря. Калибровка прибора проводилась с помощью белого диффузно отражающего экрана с известным коэффициентом яркости.

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, однако величины коэффициента яркости завышены в 3—4 раза по сравнению с характерными для данного сезона. Значения в максимуме составляют 3.13—6.60 %, что объясняется влиянием цветения кокколитофорид. Спектр с максимальными значениями в максимуме ρ_{max} = 6.60 % на длине волны λ = 495 нм зафиксирован 9 июля, а с минимальными значениями ρ_{min} = 0.13 % на длине волны 485 нм — 15 июля. При этом присутствие кокколитофорид не изменяет форму спектра восходящей яркости (рис. 2, см. вклейку). На рис. 3 приведены результаты количественного анализа изменчивости спектрального коэффициента яркости. Значения коэффициента яркости снижались в течение эксперимента, как показано на рис. 4, 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 (кокколитов) в нагонной воде.

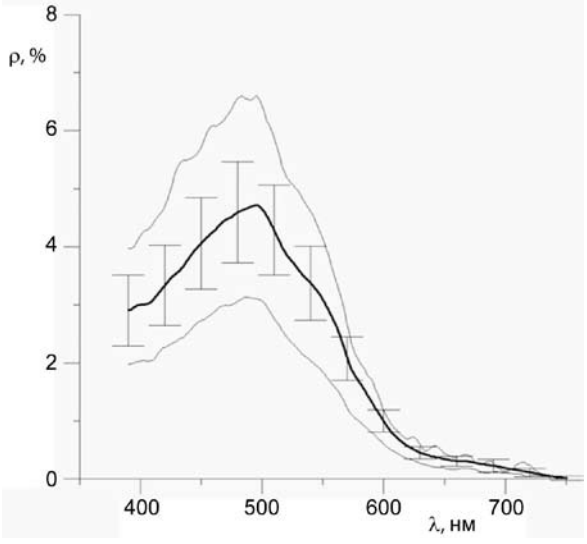

Рис. 3. Изменчивость спектрального коэффициента яркости по данным всех измерений.

Данные по коэффициенту яркости были обработаны с использованием полуаналитического алгоритма, подробно изложенного в [8]. Для определения спектрального хода обратного рассеяния на взвеси кокколитов в морской воде был использован метод Т-матриц, который позволяет рассчитать рассеяние света на полидисперсной системе произвольно ориентированных частиц [9, 10]. При расчете кокколит моделировался

эллипсоидом вращения диаметром 1.5 мкм с отношением горизонтальной оси к оси вращения равным 6.5; показатель преломления n = 1.583, среднеквадратическое отклонение гамма-распределения по размерам 10 % по данным [2, 4, 5].

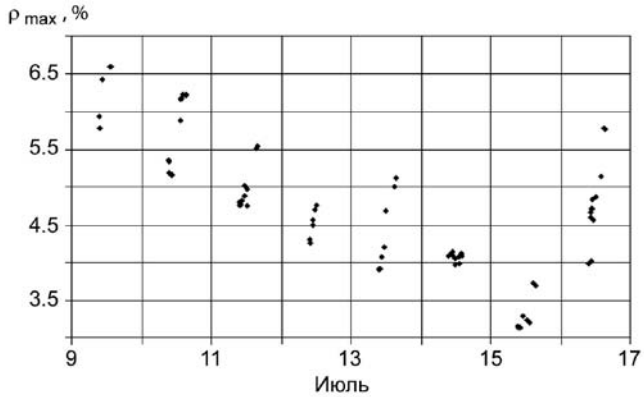

Рис. 4. Временной ход максимальных значений коэффициента яркости.

В результате расчета получена спектральная зависимость обратного рассеяния взвесью кокколитов, которая аппроксимируется уравнением $b_{bp}(\lambda) = b_{bp}(\lambda_0)\left(\lambda_0 / \lambda\right)^{0.86}$. Из работ [4, 11] известно, что спектральный наклон обратного рассеяния смесью кокколитов и клеток кокколитофорид составляет 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 кокколитофорид, минеральной взвесью иного происхождения. Не изменившаяся форма спектра коэффициента яркости показывает, что возрастание рассеяния не сопровождалось ростом поглощения, что возможно в случае преобладания количества кокколитов над крупной взвесью, включающей клетки. По литературным данным при наблюдающейся ситуации численность кокколитов на порядок выше численности иной минеральной взвеси и на два порядка — численности клеток кокколитофорид [4, 6]. Поэтому в тексте данной статьи «минеральная взвесь» будет означать минеральную взвесь, включающую кокколиты.

Для решения обратных задач восстановления оптических свойств морской воды по коэффициенту яркости моря его обычно связывают с отношением обратного рассеяния к поглощению $\frac{b_b}{a}$, где b_b — показатель обратного рассеяния морской воды, a — показатель поглощения:

$$\rho = k\frac{b_b}{a}.$$

Спектр коэффициента яркости, согласно [6], описывается формулой

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

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 [12]; ν = 0.8 согласно работе [11] и проведенным вычислениям. Параметры модели: $b_{bp}(\lambda_0)$ — показатель обратного рассеяния частиц взвеси на длине волны λ_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.

Наибольший интерес представляли концентрация хлорофилла и обратное рассеяние взвесью. На рис. 5 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. При этом средняя концентрация составляла ~0.5 мг/м^3, что несколько превышает средние значения для летнего периода, однако такое завышение содержания хлорофилла согласуется с наблюдениями других авторов [4].

После расчета трех параметров модели можно вычислить спектр поглощения пигментами, который, в отличие от стандартного, будет содержать не только хлорофилльные максимумы (рис. 6). Эти максимумы объясняют отличие измеренного спектра коэффициента яркости от рассчитанного по уже известным параметрам , и . Отклонения эти наблюдаются в узких спектральных участках и в целом не влияют на расчет параметров. Максимум на длине волны 412 нм можно соотнести

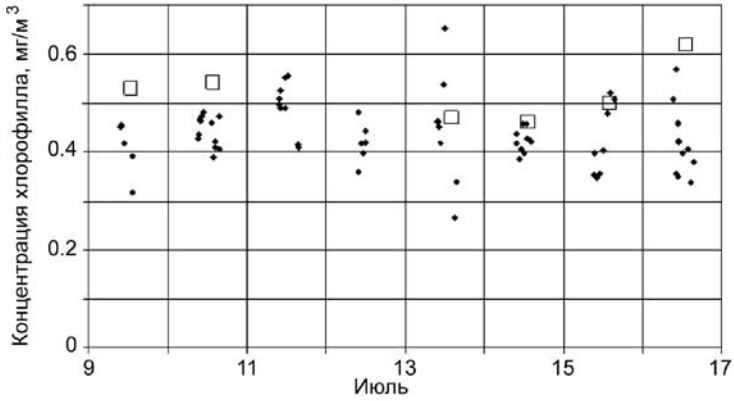

Рис. 5. Временной ход концентрации пигментов фитопланктона.
• — контактные данные; □ — спутниковые данные.

с продуктами распада хлорофилла-*a* (хлорофиллид-*a*, феофитин и др.). Максимумы поглощения на длинах волн около 570 нм можно объяснить наличием в воде цианобактерий, содержащих пигменты фикоэритрины. Кроме того, фикоэритрины имеют максимум флюоресценции при 575—585 нм, что объясняет резкий провал на длинах волн, больших 580 нм в восстановленном спектре поглощения и зачастую возникновение отрицательных значений [13].

Спектры поглощения рассчитывались по формуле

$$a^*_{chl} = \frac{1}{C_{chl}}\left[\frac{k \cdot b_b(\lambda)}{\rho(\lambda)} - a_w(\lambda) - C_{ddm}\mathrm{e}^{-\alpha(\lambda-\lambda_0)}\right],$$

где $b_b(\lambda)$ — суммарное рассеяние. Удельное поглощение пигментами фитопланктона, рассчитанное по данным контактных измерений коэффициента яркости, также имеет типичные для летнего сезона значения и спектральный ход (рис. 6).

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} (м$^{-3}$) [11], полученное по результатам модельных расчетов обратное рассеяние $b_{bp}(400)$ было пересчитано для длины волны 546 нм с учетом спектрального хода:

$$b_{b_cocc}(546) = b_{bp}(400)(400/546)^{0.8}.$$

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

$$pic \cdot \mu(\mathrm{C}) = m_{C_cocc} N_{cocc},$$

где μ(C) — молярная масса углерода; m_{C_cocc} = $2 \cdot 10^{-13}$ г — содержание углерода в кокколите по данным [4].

Временной ход величин N_{cocc}, полученных по таким оценкам, приведен на рис. 7. 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 минеральной взвеси, 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 [3].

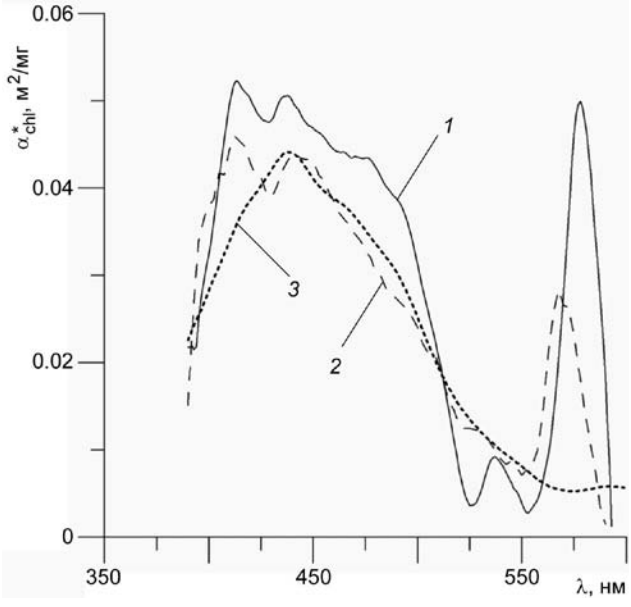

Рис. 6. Средние спектры поглощения пигментов фитопланктона.
1 — июль 2012 г., *2* — июль 2003 г.,
3 — модельный спектр [12]).

***

В июне—июле 2012 г. в Черном море наблюдалось массовое цветение кокколитофорид *Emiliania 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 ~0.5 мг/м^3, что превышает средние значения для летнего периода [14]. Причина такого повышения может заключаться в массовом развитии других видов фитопланктона наряду с кокколитофоридами;

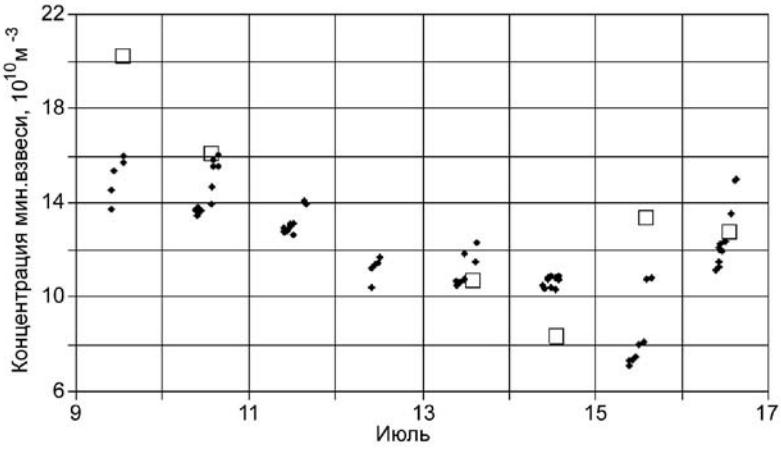

Рис. 7. Временной ход концентрации минеральной взвеси.
• — контактные данные; □ — спутниковые данные.

— расчетная концентрация минеральной взвеси (включая кокколиты) составляла ~$1.2 \cdot 10^{11}$ м$^{-3}$, что по порядку величин соответствует цветениям, зафиксированным в 1992 и 2006 г. [3].

References

1. *Yasakova O. N., Stanichny S. V.* Anomalous bloom of Emiliania Huxleyi (Prymnesiophiceae) in Black Sea in 2012. *Morsk. Ecol. Zh.* 2012, XI, 4. P. 54 (in Russian).
2. *Balch W. M.* et al. The 1991 coccolithophore bloom in the central North Atlantic. II. Relating optics to coccolith concentration. *Limnol. Oceanogr.* 1996, 41, 1684—1696.
3. *Michaelyan A. S.* et al. Development of the coccolitophores in the Black Sea: interannual and long-term changes. *Oceanology.* 2011, 51, 1, 45—53 (in Russian).
4. *Balch W. M.* et al. Biological and optical properties of mesoscale coccolithophore blooms in the Gulf of Maine. *Limnol. Oceanogr.* 1991, 36, 629—643.
5. *Balch W. M.* et al. The 1991 coccolithophore bloom in the central North Atlantic. I. Optical properties and factors affecting their distribution. *Limnol. Oceanogr.* 1996, 41, 1669—1683.
6. *Voss K. J.* Scattering and attenuation properties of Emiliania huxleyi cells and their detached coccoliths. *Limnol. Oceanogr.* 1998, 43(5), 870—876.
7. *Lee M. E., Martynov O. V.* Reflectance meter for the sub-satellite measurements of water biooptical parameters. Ecological safety of coastal and shelf zones and complex use of shelf resources. *Sevastopol, MHI NAS of Ukraine,* 2000. P. 9—17 (in Russian).
8. *Korchemkina E. N.* et al. Regional analytical algorithm of seawater constituents concentrations retrieving from sea reflectance. *Proc. IV International Conf. «Current problems in optics of natural waters». Nizhny Novgorod,* 2007. P. 166—170.
9. *Mishchenko M. I.* et al. T-matrix computations of light scattering by nonspherical particles: a review. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 1996, 55, 535—575.
10. *Leinonen J.* High-level interface to T-matrix scattering calculations: architecture, capabilities and limitations. *Opt. Express.* 2014, 22, 1655—1660.
11. *Man'kovsky V. I.* et al. Long-term variability of water transparency in the Black Sea and the factors behind the its strong decline in late 80's—early 90-ies. Preprint. *Sevastopol, MHI NAS of Ukraine,* 1996. 32 p. (in Russian).
12. *Bricaud A.* et al. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization. *J. Geophys. Res.* 1995, 100, C7, 13321—13332.
13. *Rowan K. S.* Photosynthetic pigments of algae. *Cambridge University Press,* 1989. 334 p.
14. *Churilova T. Ya., Suslin V. V.* Seasonal and inter-annual variability in waters transparency, chlorophyll a content and primary production in the Black Sea simulated by spectral bio-optical models based on satellite data (SeaWiFS). *Ocean Optics XXI. Glasgow,* 2012. CD, 13 p.

Статья поступила в редакцию 01.10.2014 г.

К статье *Бородин А. Е.* **«Методы контроля...»**

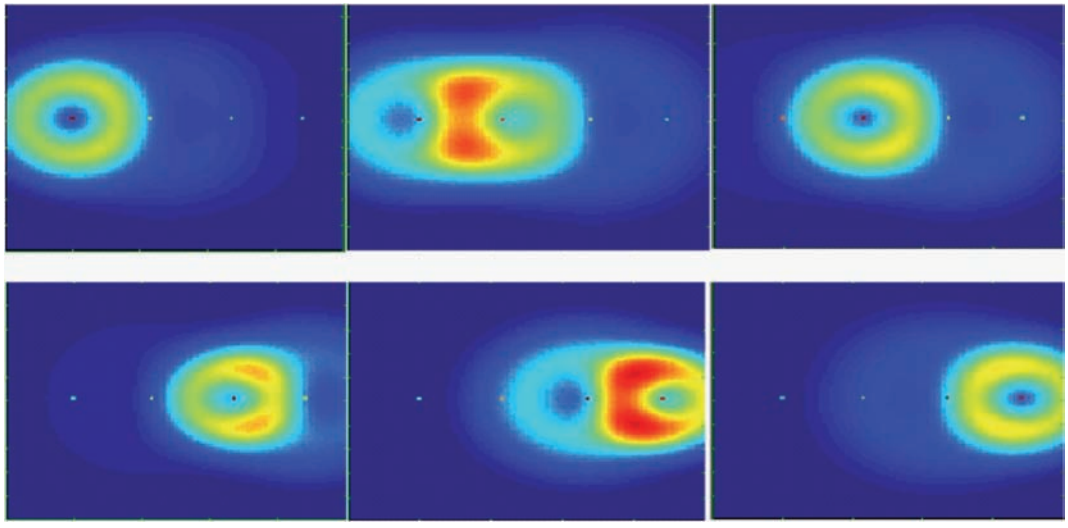

Рис. 4. Последовательные кадры моделирования изменений аномалии гидрофизического параметра, создаваемой источником, движущимся вдоль линейной измерительной сети из четырех скалярных датчиков.

К статье *Корчемкина Е. Н., Ли М. Е.* **«Аномальные оптические характеристики...»**

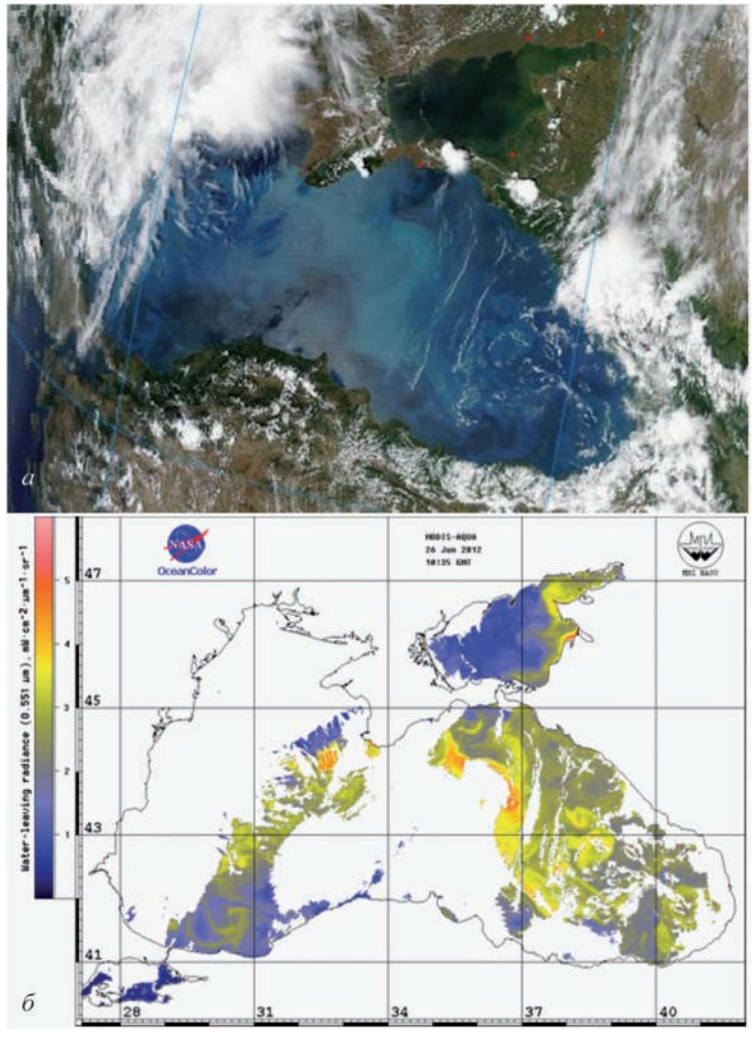

Рис. 1. Спутниковое изображение Черного моря (*а*) и распределение яркости после применения маски облачности (*б*) за 26.06.12. Изображения предоставлены сайтом http://blackseacolor.com.

К статье *Корчемкина Е. Н., Ли М. Е.* **«Аномальные оптические характеристики...»**

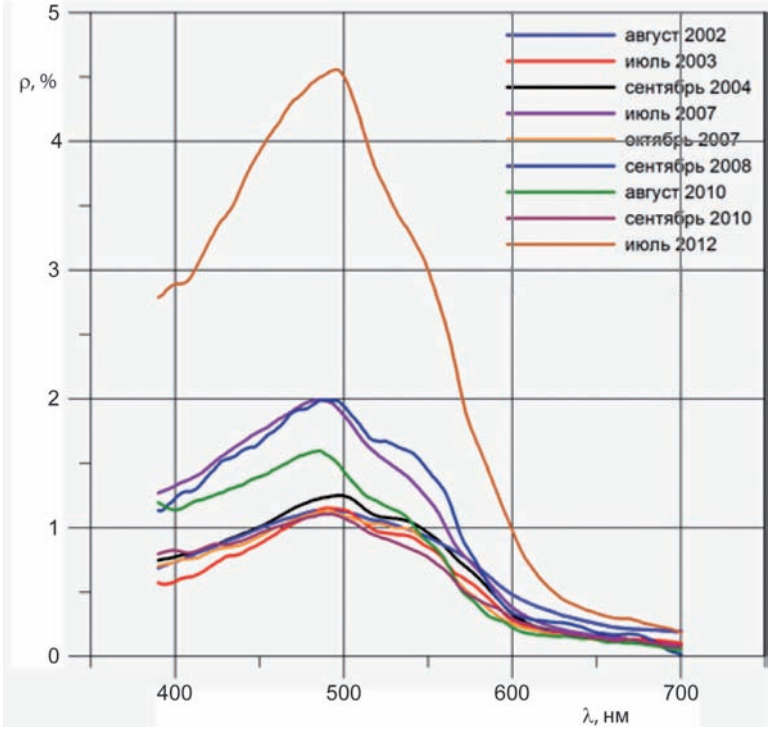

Рис. 2. Средние спектры коэффициента яркости.