

О мезомасштабной структуре спутниковых изображений Чёрного моря во время цветения кокколитофорид

Г. С. Карабашев

*Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: genkar@mail.ru*

Работа посвящена воздействию цветения кокколитофорид на мезомасштабную изменчивость спектральных коэффициентов яркости Rrs вне прибрежий Чёрного моря. Показателем пространственной изменчивости служила автокорреляционная функция (АКФ), а объектами исследования были выбраны два изображения тест-площадки в Чёрном море. Они одинаковы по качеству, но получены на начальной стадии и во время кульминации цветения в 2006 г. сканером MERIS с разрешением 300 м. Данные, осреднённые на сетке 1×1 км, использовались для картирования $Rrs(560)$ на тест-площадке и расчёта автокорреляционной функции коэффициентов Rrs на длинах волн 443, 510, 560, 681 нм вместе с концентрацией хлорофилла CHL по стандартному MERIS-алгоритму. АКФ находили по распределениям названных характеристик вдоль семи меридиональных трасс на тест-площадке. Установлена тенденция, общая для всех характеристик: интенсификация цветения сопровождается упрощением и унификацией формы АКФ таким образом, что они становятся неотличимы от АКФ для $Rrs(681)$. Этот факт и учёт специфики оптических свойств черноморских вод приводят к выводу о реальности пороговой интенсивности цветения, по достижении которой слой формирования восходящей яркости не превышает 2 м, независимо от её спектральной принадлежности. Предположительно, причина в том, что обратное рассеяние солнечной радиации кокколитофоридной кальцитовый взвесью становится настолько значительным при достижении указанного порога, что вклад иных факторов формирования восходящей яркости становится пренебрежимо малым. Если это так, то унификация и упрощение АКФ-характеристик морской среды, найденных по определениям спектральных Rrs , может иметь место и в период цветений кокколитофорид на иных океанологически различных акваториях.

Ключевые слова: коэффициент яркости, мезомасштабные неоднородности, автокорреляционная функция, дистанционное зондирование, MERIS, Чёрное море, цветение кокколитофорид

Одобрена к печати: 21.12.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-183-190

Введение

Мезомасштабные движения вод океана характеризуются протяжённостью от 5–10 до ~100 км и временем жизни от нескольких часов до 10–15 сут. Подобные движения типичны для зон смешения разнородных вод. Распространённость мезомасштабных структур в Чёрном море очевидна с последней четверти прошлого столетия благодаря спутниковым наблюдениям в ИК-, СВЧ- и видимом диапазонах (Лаврова и др., 2011). Форма некоторых структур позволяет трактовать их как проявления динамических событий в приповерхностной толще моря (Гинзбург и др., 2008). На спутниковых изображениях водных бассейнов они обычно сосуществуют со структурами произвольной формы. Последние не поддаются простому определению и потому ускользают от осмысления, несмотря на их потенциально важную роль как фактора изменчивости условий обитания морской биоты. Очевидно, здесь требуются методы статистики пространственных переменных как средство объективного анализа структуры природной среды.

Цель настоящей статьи — получить представление о применимости оценок автокорреляционной функции (АКФ) распределений спектральных коэффициентов яркости Rrs для объективной индикации изменений структуры изображений Чёрного моря с развитием цветения кокколитофорид. Такое цветение происходит здесь в мае – июне после суровых зим (Буренков и др., 2011; Карабашев, Евдошенко, 2015; Сокасаг et al., 2004). При максимальном развитии оно охватывает большую часть бассейна и выражается в кратном увеличении

солнечной радиации, обратно рассеянной водной толщей в атмосферу из-за обилия кальциевой взвеси, т. е. целых и фрагментированных панцирей кокколитофорид. АКФ представляет интерес как зависимость между распределением Rrs вдоль трассы и его сдвинутой копией от величины пространственного сдвига. Экстремумы АКФ, значимо отличающиеся от нуля, свидетельствуют о наличии неоднородностей среды с масштабами, соответствующими абсциссе экстремума.

Подходы, материалы и методы

Распределения характеристик среды, регистрируемые современными сканерами цвета океана, доступны пользователям в виде цифровых изображений. Их пиксели характеризуются географическими координатами и оценками регистрируемых величин (продукты уровня L2). Это почти то, что требуется для оценки АКФ любой из них. Необходимо лишь спроецировать их на регулярную сетку линейных координат и устранить пробелы в данных, неизбежных из-за облачности и других помех. Такая процедура позволит воспользоваться общедоступными средствами для расчёта АКФ. Для выполнения этих требований и в соответствии с целью настоящей статьи было отдано предпочтение данным сканера MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) с номинальным разрешением на местности $GSD = 300$ м и спектральными каналами на длинах волн $\lambda = 413, 443, 490, 510, 560, 620, 665, 681$ нм.

С помощью браузера на сайте NASA были выбраны и загружены изображения Чёрного моря, полученные MERIS во время цветения кокколитофорид 24 мая 2006 г. (сцена M2006144080837.L2_FRS_OC, загружена 11.11.2015) и 6 июня 2006 г. (сцена M2006157080018.L2_FRS_OC, загружена 10.11.2015). Браузер SMCS (Шеберстов, 2015) использовался, чтобы на этих сценах выбрать тест-площадку от 42° с. ш., $32,5^\circ$ в. д. до 45° с. ш., 36° в. д., свободную от пробелов в данных, влияния солнечного блика и других помех. Скромные размеры тест-площадки позволили преобразовать географические координаты пикселей в линейные без существенных искажений картины. Она простиралась на 225 км к северу и 280 км к востоку от точки 42° с. ш., $32,5^\circ$ в. д.

Дальнейшая обработка данных выполнялась с помощью программного скрипта в среде MATLAB. Он предусматривал вычитание линейного тренда из распределения переменной на заданной трассе и расчёт АКФ с помощью функции $xscgt$. Оценки переменных уровня L2 — $Rrs(443)$, $Rrs(510)$, $Rrs(560)$, $Rrs(681)$ и CHL (содержание хлорофилла в воде согласно стандартному MERIS алгоритму) были выбраны для определения их АКФ по следующим соображениям. Все Rrs растут с концентрацией частиц, взвешенных в морской воде, но по-разному реагируют на наличие в ней окрашенных растворённых органических соединений (CDOM). Они существенно снижают $Rrs(443)$, несколько ослабляют $Rrs(510)$ и практически не сказываются на $Rrs(560)$ и $Rrs(681)$. Однако $Rrs(681)$ принадлежит красной области спектра, где солнечное излучение сильно ослабляется водой как таковой. Поэтому вне прибрежий Чёрного моря слой формирования $Rrs(560)$ отличается наибольшей глубиной по сравнению с соответствующими толщами остальных Rrs . Стандартный MERIS-алгоритм определения концентрации хлорофилла в воде основан на отношении коэффициентов яркости различной спектральной принадлежности.

Результаты

Рисунок 1 даёт представление о распределениях $Rrs(560)$ на тест-площадке 24 мая и 6 июня 2006 г. В обоих случаях очевидны структуры преимущественно широтного простирания, которые визуализируются оценками $Rrs(560)$, убывающими с востока на запад. Такая конфигурация соответствует картине среднемноголетней циклонической циркуляции поверхностного слоя Чёрного моря и определяет выбор меридиональных трасс для расчёта АКФ. Они проложены через каждые 20 км по долготе от начала координат и обозначены пунктиром. В отсутствие цветений обычны оценки $Rrs(560) < 1\%$ вне прибрежий Чёрного моря, но при

цветении они многократно превышают этот порог, как, например, во время рекордно интенсивного цветения 2012 г. (Ясакова, Станичный, 2012). Таким образом, наши оценки АКФ были получены на начальной и относительно зрелой стадии цветения кокколитофорид средней интенсивности.

Рассчитанные АКФ приведены на *рис. 2 и 3*. Отметим следующие закономерности:

- 1) тенденция к упрощению и единообразию формы АКФ в июне по сравнению с маем;
- 2) появление статистически значимых минимумов АКФ с амплитудой около $-0,6$ на сдвигах $50-60$ км в июне при развитом цветении (см. *рис. 3*);
- 3) систематическое расхождение между формой АКФ величины СНЛ и формами АКФ коэффициентов яркости, похожими друг на друга;
- 4) тенденция уменьшения крутизны начального участка АКФ ($1 \geq S \geq 0$) в июне относительно майских АКФ.

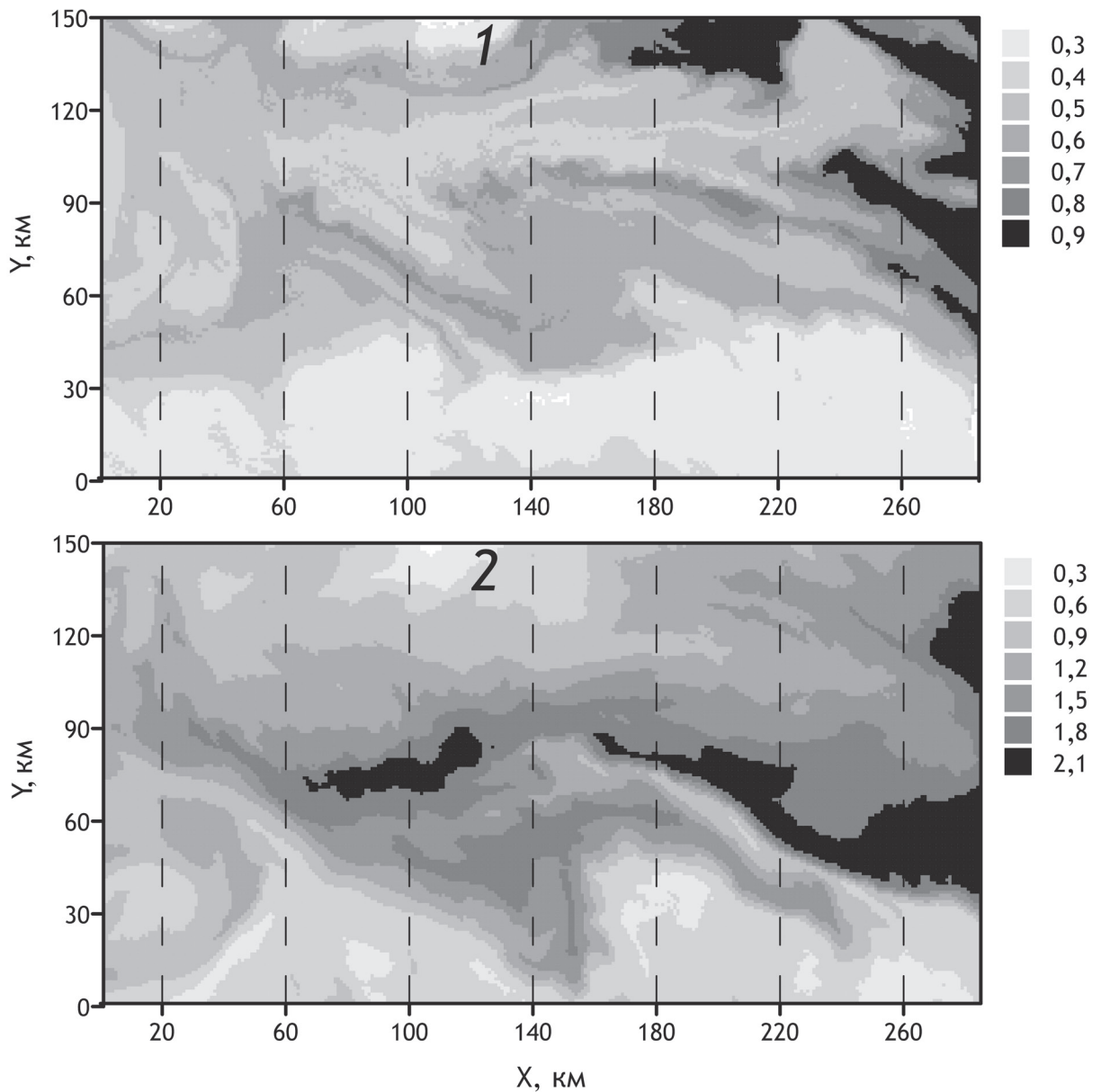


Рис. 1. Распределения $Rrs(560) \% \cdot \text{cp}^{-1}$ относительно точки 42° с. ш., $32,5^\circ$ в. д. в Чёрном море, построенные по данным сканера MERIS от 24 мая (1) и 6 июня (2) 2006 г. с усреднением в ячейках регулярной сетки с шагом 1 км. Данные вдоль трасс, обозначенных пунктиром, использовались для оценки автокорреляционных функций на *рис. 2 и 3*

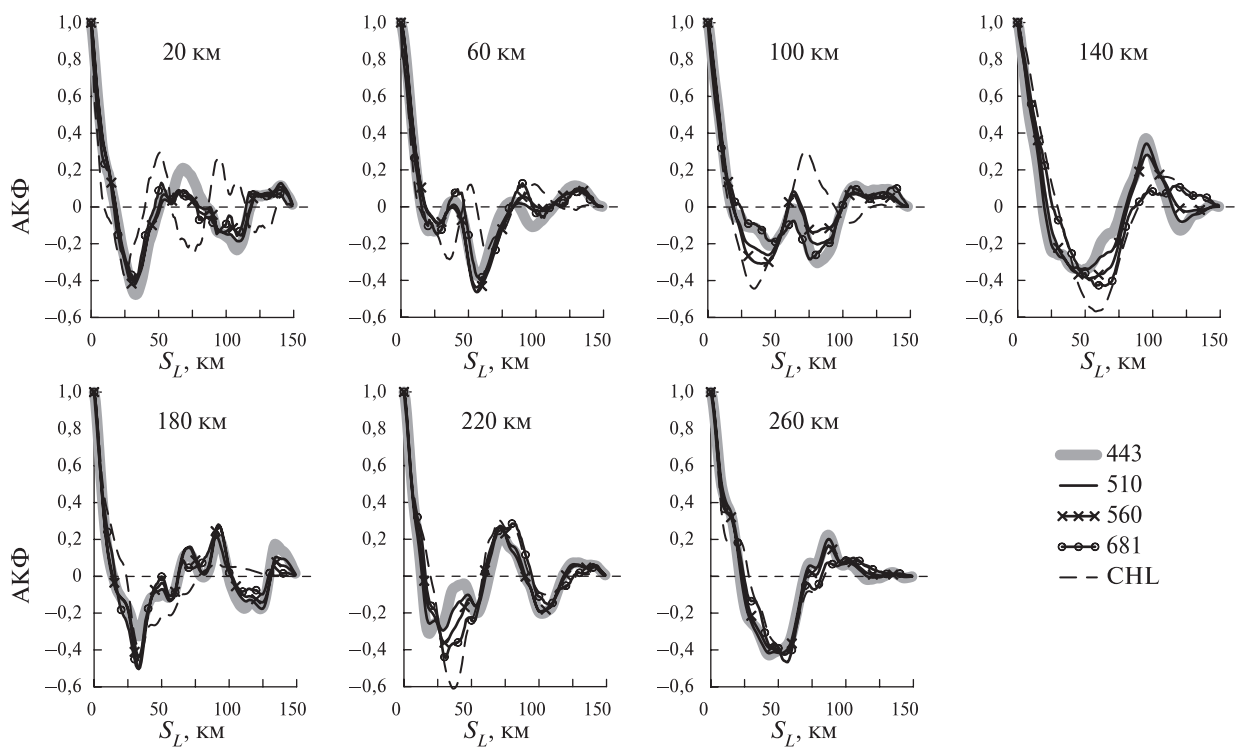


Рис. 2. Автокорреляционные функции АКФ распределений коэффициентов яркостей Rrs на длинах волн 443, 510, 560, 681 нм и концентрации хлорофилла CHL вдоль меридиональных трасс рис. 1 (1) на широтных отметках от 20 до 260 км. АКФ рассчитаны по данным MERIS-снимка тест-площадки от 24.05.2006, осреднённым на последовательных отрезках длиной 1 км. S_L (км) — величина сдвига по меридиану

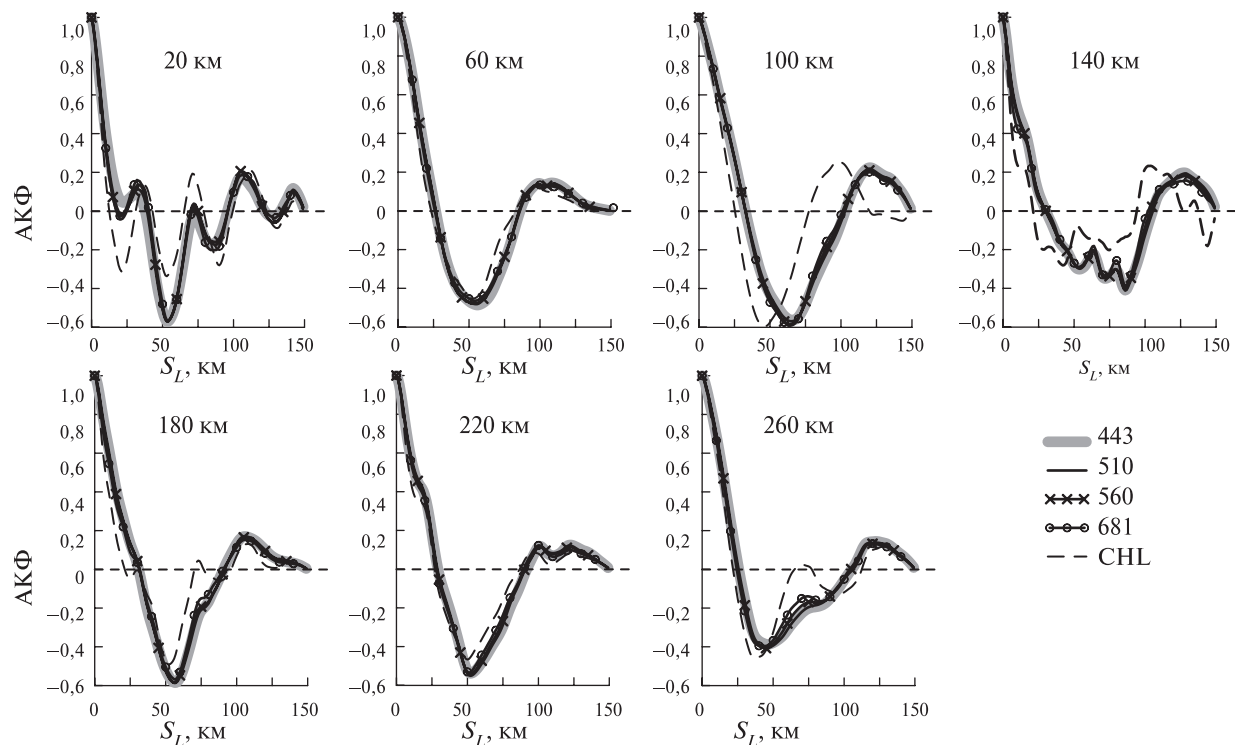


Рис. 3. Автокорреляционные функции АКФ-распределений коэффициентов яркостей Rrs на длинах волн 443, 510, 560, 681 нм и концентрации хлорофилла CHL вдоль меридиональных трасс рис. 1 (2) на широтных отметках от 20 до 260 км. АКФ рассчитаны по данным MERIS-снимка тест-площадки от 06.06.2006, осреднённым на последовательных отрезках длиной 1 км. S_L (км) — величина сдвига по меридиану

Обсуждение результатов

Оба распределения $Rrs(560)$ на *рис. 1* характеризуются более широким набором $Rrs(560)$ градаций на востоке тест-площадки, чем на западе, а двукратный рост верхнего предела $Rrs(560)$ за две недели указывает на важную роль цветения кокколитофорид, возникшего восточнее тест-площадки незадолго до съёмки соответствующих картин. Сам факт и форма распространения цветения с востока на запад согласуется с представлением о квазипостоянном антициклоническом переносе примесей Основным черноморским течением (ОЧТ) вдоль континентального склона Чёрного моря.

Как известно, цветение кокколитофорид в разы усиливает ослабление солнечной радиации в подповерхностной толще вследствие многократного рассеяния света кальцитовый взвесью. Крупность её частиц велика относительно длины волны видимого солнечного излучения, и потому кокколитофоридная составляющая ослабления солнечной радиации почти одинаково ослабляет излучение разной цветности. Показатель вертикального ослабления облучённости сверху K_d служит мерой этого процесса. Он неплохо изучен в работе (Jerlov, 1976) и представлен среди продуктов уровня L2 сканеров цвета океана, включая MERIS. Известно также, что толщина слоя формирования 90% восходящей солнечной радиации $Z = 1/K_d$ (Gordon, McCluney, 1975), что даёт возможность определять эту характеристику по спутниковым оценкам K_d , но лишь в случае, когда они определены посредством алгоритма, учитывающего особенности оптического режима вод того или иного региона. Такое условие не позволило воспользоваться определениями K_d , найденными с помощью универсального алгоритма для вод открытого океана и представленными в исходных данных наряду с оценками Rrs .

Эту трудность удалось обойти, опираясь на оптическую классификацию вод (Jerlov, 1976) и АКФ для $Rrs(681)$ как внутренний репер в процедуре обработки данных. $Rrs(681)$ принадлежит красной области спектра, где поглощение света водой как таковой гораздо выше поглощения света окрашенными примесями. Если воспользоваться оценками K_d в таблице XXVII статьи (Jerlov, 1976) при $\lambda = 675$ нм и найти по ним оценки Z для вод разной прозрачности (I, II — воды океана; 1, 3, 5 — шельф и внутренние моря), то получится последовательность 2,4; 2,2; 2,0; 1,8; 1,5 м. С переходом к $\lambda = 681$ нм эта последовательность сохранится, но оценки несколько уменьшатся в соответствии с ростом поглощения света водой с длиной волны излучения в красной области спектра. Появление составляющей ослабления света, обусловленной цветением кокколитофорид, дополнительно уменьшит все члены этой последовательности. С большим запасом можно принять, что в Чёрном море канал сканера MERIS на 681 нм зондирует приповерхностный слой глубиной не более 2 м в любых условиях и не реагирует на оптические возмущения среды глубже этого порога.

Аналогичные последовательности оценок $Z = 16; 11; 8; 5; 3$ м в зелёной (550 нм) и $Z = 53; 15; 4; 2,6; 1,8$ м в синей (450 нм) областях спектра показывают, что в отсутствие цветений средне- и коротковолновые каналы сканера чувствительны к гораздо более глубоким слоям по сравнению с каналом на 681 нм (до 4–8 м в Чёрном море). При развитии цветении затенение глубинных слоёв кальцитовый взвесью в приповерхностном слое настолько велико, что все каналы становятся одинаково невосприимчивы к радиации, обратно рассеянной в толще глубже 2 м от поверхности. Тем самым исключаются два фактора изменчивости формы спектральных АКФ вдоль меридиональной трассы в Чёрном море: непостоянство залегания границы раздела «приповерхностный слой — подстилающая толща» и горизонтальный обмен в этой толще.

Проявления такого обмена обозначены градациями $Rrs(560)$ на *рис. 1*. Здесь видны горизонтальные неоднородности зонального простирания с поперечником одного порядка с величиной сдвигов S , к которым привязаны статистически значимые минимумы на некоторых графиках *рис. 2* и *3*. Разница в том, что сдвиги на оси абсцисс, к которым привязаны экстремумы АКФ, являются объективными оценками размеров неоднородностей, свойственных пространственному распределению исследуемой характеристики, тогда как выбор и восприятие градаций, визуализирующих её неоднородности, всегда несколько субъективны.

Систематическое расхождение между формами АКФ переменных CHL и $Rrs(560)$ объясняется тем, что CHL рассчитывалась посредством стандартного алгоритма, основанного на определениях по крайней мере двух спектрально различных коэффициентов яркости и не адаптированного к условиям Чёрного моря в период цветения кокколитофорид.

Заключение

Основные результаты работы сводятся к двум положениям. Во-первых, сколь-нибудь развитое цветение кокколитофорид упрощает структуру полей оптических характеристик за счёт неоднородностей средней и большой протяжённости в пределах границ мезомасштабной изменчивости. Это обстоятельство ограничивает возможности диагностики горизонтального водообмена по оптическим характеристикам в период цветения, поскольку водная взвесь как главный оптический маркер обмена меняется в пространстве в силу факторов биологической природы (не соблюдается требование консервативности к трассере водообмена). Во-вторых, сравнительный анализ показаний длинно- и коротковолновых каналов дистанционных сенсоров цвета океана может быть полезен для неконтактной индикации изменчивости толщины слоя формирования восходящей яркости. Для уточнения и реализации результатов требуются дальнейшие исследования.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2018-0002). Исходные данные сенсора MERIS уровня L2 в виде оценок Rrs и CHL для Чёрного моря были подготовлены и сделаны доступными для отбора и загрузки в NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) Ocean Color Data; 2014 Reprocessing. NASA OB.DAAC, Greenbelt, MD, USA. DOI: 10.5067/ENVISAT/MERIS/L2/OC/2014. Accessed on 10.11.2015.

Литература

1. Буренков В. И., Копелевич О. В., Шеберстов С. В., Вазюля С. В. Сезонные и межгодовые изменения биооптических характеристик Чёрного моря по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 190–199.
2. Гинзбург А. И., Зацепин А. Г., Кременецкий В. В., Пиотух В. Б. Мезомасштабная динамика вод Чёрного моря // Океанология на старте XXI века. М.: Наука, 2008. С. 11–42.
3. Карабашев Г. С., Евдошенко М. А. Проявления Основного Черноморского течения, «цветения» кокколитофорид и континентального стока в среднемесячных распределениях коэффициента яркости Чёрного моря // Океанология. 2015. Т. 55. № 1. С. 44–55.
4. Лаврова И. Ф., Костяной А. Г., Лебедев С. А., Митягина С. И., Гинзбург А. И., Шеремет Н. А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 480 с.
5. Шеберстов С. В. Система пакетной обработки океанологических спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 6. С. 154–161.
6. Ясакова О. Н., Станичный С. В. Аномальное цветение *Emiliania huxleyi* (Prymnesiophyceae) в Чёрном море в 2012 г. // Морський екологічний журн. 2012. Т. 11. № 4. С. 54.
7. Cokacar T., Oguz. T., Kubilay N. Satellite-detected early summer coccolithophore blooms and their interannual variability in the Black Sea // Deep-Sea Res. 2004. V. 51. No. 8. P. 1017–1031.
8. Gordon H. R., McCluney W. R. Estimation of the depth of sunlight penetration in the sea for remote sensing // Applied Optics. 1975. V. 14. P. 413–416.
9. Jerlov N. G. Marine Optics. Amsterdam: Elsevier, 1976. 233 p.

On the mesoscale structure of the Black Sea satellite images during coccolithophorid bloom

G. S. Karabashev

*P. P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: genkar@mail.ru*

The work is devoted to the effect of blooms of coccolithophores on the mesoscale variability of the spectral reflectance Rrs in the Black Sea offshore. The indicator of spatial variability was the autocorrelation function (ACF). Two images of the testing site in the Black Sea served as a matter for enquiry. They exhibited equally acceptable quality, corresponded to early and mature age of the bloom in 2006, and were obtained with the MERIS sensor at GSD = 300 m. After averaging over 1×1 km cells, these data were used for mapping $Rrs(560)$ over the testing site and computing the ACF of distributions of Rrs at $\lambda = 443, 510, 560, 681$ nm and CHL (content of chlorophyll a in water found with the universal MERIS-algorithm) in seven meridional sections within the testing sites. A trend common to all characteristics is established: bloom intensification is accompanied by simplification and unification of the form of ACF in such a way that they become indistinguishable from ACF for $Rrs(681)$. This fact and specific optical properties of the Black Sea waters allow you to admit that the layer of water-leaving radiance origination cannot be more than 2 m thick regardless of wavelength as soon as a threshold intensity of blooming is reached. Conceivably, in this case the backscattering of solar radiation by the coccolithophoric calcite suspension becomes so significant that contributions of other factors of water-leaving radiance origination are negligible. If so, simplification and unification of the ACF of quantities retrieved from spectral reflectance may be inherent to coccolithophores blooms of the highest intensity in any oceanological province.

Keywords: reflectance, mesoscale inhomogeneities, autocorrelation function, remote sensing, MERIS, Black Sea, coccolithophore bloom

Accepted: 21.12.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-183-190

References

1. Burenkov V. I., Kopelevich O. V., Sheberstov S. V., Vazyulya S. V., Sezonnye i mezhdogovye izmeneniya bioopticheskikh kharakteristik Chernogo morya po sputnikovym dannym (Seasonal and annual variations of bio-optical characteristics of the Black Sea from satellite data), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 2, pp. 190–199.
2. Ginzburg A. I., Zatsepin A. G., Kremenetskii V. V., Piotukh V. B., *Mezomasshtabnaya dinamika vod Chernogo morya* (Mesoscale dynamics of the Black Sea waters), In: *Okeanologiya na starte XXI veka* (Oceanology at the start of XXI century), Moscow: Nauka, 2008, pp. 11–42.
3. Karabashev G. S., Evdoshenko M. A., Proyavleniya Osnovnogo Chernomorskogo techeniya, “tsveteniya” kokkolitoforid i kontinental'nogo stoka v srednemesyachnykh raspredeleniyakh koeffitsienta yarkosti Chernogo morya (Manifestations of the Rim Current, coccolithophore blooms, and continental runoff in monthly-mean distributions of reflectance of the Black Sea), *Okeanologiya*, 2015, Vol. 55, No. 1, pp. 44–55.
4. Lavrova I. F., Kostyanoi A. G., Lebedev S. A., Mityagina S. I., Ginzburg A. I., Sheremet N. A., *Kompleksnyi sputnikovyi monitoring morei Rossii* (Complex Satellite Monitoring of the Russian Seas), Moscow: IKI RAN, 2011, 480 p.
5. Sheberstov S. V., Sistema paketnoi obrabotki okeanologicheskikh sputnikovyykh dannyykh (A system for batch processing of oceanological satellite data), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 6, pp. 154–161.
6. Yasakova O. N., Stanichnyi S. V., Anomal'noe tsvetenie *Emiliana huxleyi* (Prymnesiophyceae) v Chernom more v 2012 g. (Anomalous Blooming of *Emiliana huxleyi* (Prymnesiophyceae) in the Black Sea in 2012), *Mors'kii ekologichnii zhurnal*, 2012, Vol. 11 (4), p. 54 (in Russian).

7. Cokacar T., Oguz T., Kubilay N., Satellite-detected early summer coccolithophore blooms and their inter-annual variability in the Black Sea, *Deep-Sea Research*, 2004, Vol. 51, No. 8, pp. 1017–1031.
8. Gordon H. R., McCluney W. R., Estimation of the depth of sunlight penetration in the sea for remote sensing, *Applied Optics*, 1975, Vol. 14, pp. 413–416.
9. Jerlov N. G., *Marine Optics*, Amsterdam: Elsevier, 1976, 233 p.