

Изменчивость июньского максимума коэффициента яркости Черного моря по спутниковым данным декадной длительности

Г.С. Карабашев, М.А. Евдошенко

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

Анализируются проявления "цветений" кокколитофорид в Черном море. Они происходят с конца мая по начало июля и позволяют следить за жизнедеятельностью водорослей в водной среде спутниковыми методами благодаря кратному повышению коэффициента яркости моря. В работе используются данные сканеров цвета океана SeaWiFS и MODIS-Aqua за 2001-2012 гг. и уделяется особое внимание изменчивости коэффициента яркости во время рекордно мощного цветения 2012 г. Согласно результатам сравнительного анализа изменчивости коэффициента яркости в четырех экологически различных тест-регионах, "цветение" охватывает только глубоководную зону, отличается значительной пространственной неоднородностью и достигает максимума на востоке моря. Показано, что проявления "цветения" релаксируют быстрее в длинноволновой области спектра, чем в его средней части, скорее всего из-за различий толщины слоя формирования соответствующих восходящих яркостей. Наши результаты уточняют закономерности черноморского "цветения" кокколитофорид и должны учитываться при истолковании раннее-летних изображений Черного моря.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, "цветение" кокколитофорид, Черное море, долгопериодная изменчивость, июньская аномалия яркости.

Введение

Систематическое изучение июньского максимума коэффициента яркости Черного моря началось после выхода на орбиту сканера цвета океана (СЦО) SeaWiFS в 1997 г. Первое обобщение результатов наблюдений этого явления закрепило представление о его обусловленности раннелетним "цветением" кокколитофорид продолжительностью до 3-4 недель, обратило внимание на пространственную изменчивость и межгодовую перемежаемость его проявлений в поле яркости, а также на сходство обстоятельств, сопутствующих "цветению" кокколитофорид в Черном море и на весьма далеких акваториях открытого океана (Сокасар et al., 2004). Следуя обстоятельной работе (Iglesias-Rodriguez et al., 2002), авторы обобщения называют стабильность столба воды, максимальную инсоляцию водной толщи и сравнительно низкий уровень содержания биогенных элементов в воде в качестве отличительных особенностей водной среды, сопутствующих "цветению" кокколитофорид на фоне "нецветения" прочих видов черноморского фитопланктона.

Наибольшие стабильность и инсоляция ежегодно реализуются к середине июня, когда рост облученности моря Солнцем почти прекращается с приближением к дню летнего солнцестояния, а содержание биогенных элементов еще не упало до фоновых значений после весеннего "цветения" диатомовых. Черноморский сезонный пикноклин формируется в мае-июне благодаря прогреву верхнего слоя вод. Он особенно резок и неглубок после относительно холодных зим (Титов, 2004). Такой пикноклин препятствует верти-

кальному водообмену и поддерживает высокую стабильность столба воды, способствуя ускоренному развитию кокколитофорид. Действительно, по спутниковым данным была выявлена сильная обратная корреляция между среднефевральской температурой поверхности Черного моря и ее яркостью в июне (Burenkov et al., 2005). Совместный анализа поля плотности воды и яркости поверхности моря в апреле-июне 1998-2002 гг. на 100-мильном разрезе на северо-востоке моря подтвердил прямую связь раннелетней яркости Черного моря с наличием неглубокого резкого сезонного пикноклина (Карабашев и др., 2006). Были предложены и проверены подходы к различению вкладов частиц кокколитофоридного происхождения и частиц иного генезиса в раннелетний максимум коэффициента яркости Черного моря (Копелевич и др., 2012).

Накопленный объем спутниковых наблюдений дает возможность оперировать декадными длительностями рядов данных вместо серий продолжительностью по три-четыре года. В 2012 г. раннелетний максимум коэффициента яркости Черного моря достиг невиданной ранее амплитуды (Ясакова, Станичный, 2012), а это редкое событие крайне важно для прогнозных оценок и понимания явления в целом. Цель нашей работы – уточнить закономерности изменчивости раннелетнего максимума коэффициента яркости черноморского бассейна с учетом новейших данных наблюдений с помощью СЦО и свидетельств, полученных ранее традиционными средствами.

Материалы и методы

Использовались стандартные продукты СЦО MODIS-Aqua уровня L2 с номинальным размером элемента изображения (пикселя) на местности 1×1 км. Они представлены на портале NASA (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>) после репроцессинга 2009-2010 гг. и были загружены нами в виде цифровых изображений Черного моря за период с 2003 по 2012 гг. с апреля по сентябрь каждого года. Атрибутами пикселей таких изображений служат географические координаты и оценки коэффициентов яркости R_{rs} на длинах волн λ спектральных каналов сканера от 412 до 678 нм. Дополнительно загружались аналогичные продукты СЦО SeaWiFS за 2001-2002 гг.

Как известно, облачность и другие естественные помехи не позволяют полностью реализовать потенциал оптического зондирования Земли из космоса, порождая пробелы данных в границах отдельного изображения и потери изображений той или иной акватории в течение заданных временных интервалов. Пробелы и потери растут с сокращением относительного солнечного сияния. В черноморском регионе оно убывает в 2-3 раза зимой по сравнению с летом (Макеева, 1991). По этим причинам достаточно реалистичные

среднемесячные распределения Rrs можно получить в период с апреля по октябрь, когда в среднем за месяц бывает от 6-8 до 10-14 снимков черноморского бассейна, приемлемых по плотности покрытия акватории доброкачественными пикселями. Для осреднения таких изображений требуется предварительно спроектировать их на регулярную сетку, так как межпиксельные расстояния на снимке непостоянны.

Оригинальные распределения осреднялись в ячейках $3,6 \times 3,6$ км регулярной сетки. Она же использовалась для получения среднемесячных распределений. При этом мы опробовали два варианта осреднения: по всем снимкам приемлемого качества за месяц (доброкачественные пиксели занимают не менее 10% площади моря) и по трем изображениям, наилучшим по покрытию моря доброкачественными пикселями. Преимущество первого варианта состоит в несколько большей статистической обеспеченности оценок средних Rrs. Второй вариант лучше отвечает требованию однородности условий формирования исходной выборки изображений, поскольку незначительность пробелов достижима только при благоприятных погодных условиях на всей исследуемой акватории. Сравнение среднемесячных распределений, полученных указанными способами, не выявило существенной разницы в их структуре и амплитуде. Причина, видимо, в том, что качество оригинальных снимков месячной выборки, ранжированных по убыванию доли доброкачественных пикселей, быстро падает после первых трех наилучших изображений, и фактический выигрыш в обеспеченности средних распределений Rrs при осреднении по первому варианту оказывается не так значителен, как можно было бы ожидать, исходя из объема выборки.

Простираение Черного моря достаточно велико, чтобы реализация предпосылок "цветения" кокколитофорид (инсоляция, запас и состав биогенных элементов, состояние сезонного пикноклина) оказалась зависящей от местных условий. Как известно, акватории Черного моря к западу и востоку от 34° в.д. неодинаковы по экологическим условиям.

Поэтому мы выделили западный (W, к западу от $33,5^\circ$ в.д.) и восточный (E, к востоку от $34,5^\circ$ в.д.) тест-регионы котловины Черного моря, а также придунайскую область вместе с внешним и внутренним северо-западным шельфом к северу от 44° с.ш. (NW) и Азовское море (Az) (рис. 1). Основным показателем среднемесячного уровня Rrs в том или ином регионе была выбрана гистограмма распределения Rrs как наиболее информативная характеристика среди средств описательной статистики. Среднемесячные гистограммы рассчитывались по данным, осредненным на вышеназванной регулярной сетке для каждого года с 2001 по 2012 гг. Для регионов W и E они строились для Rrs(555) и Rrs(645) с тем, чтобы сравнить поведение июньского максимума яркостей, формирую-

щихся в толщах до 10-15 м ($\lambda = 555$ нм) и не глубже 3 м ($\lambda = 645$ нм). Для мелководных регионов NW и Az строились только гистограммы оценок $Rrs(645)$.

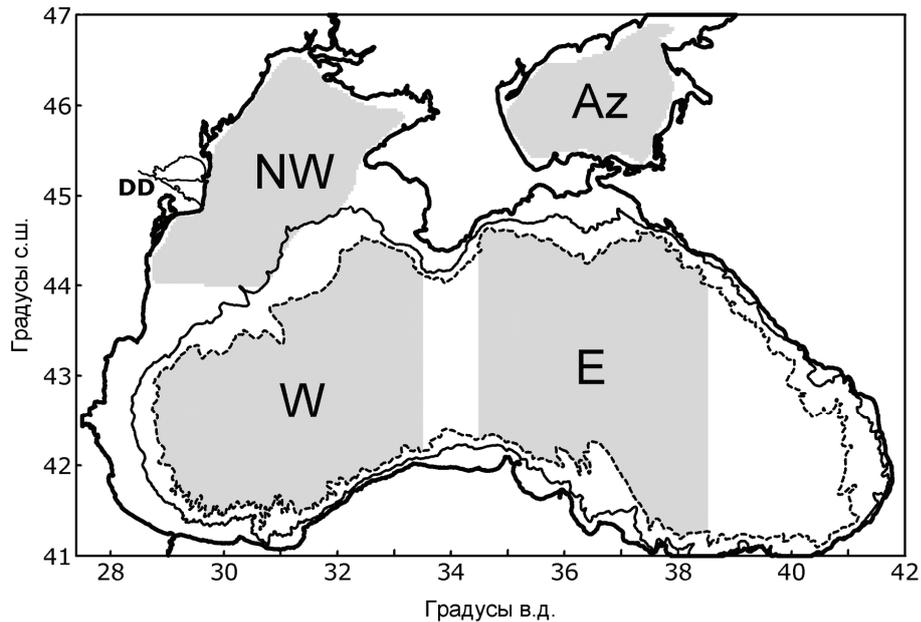


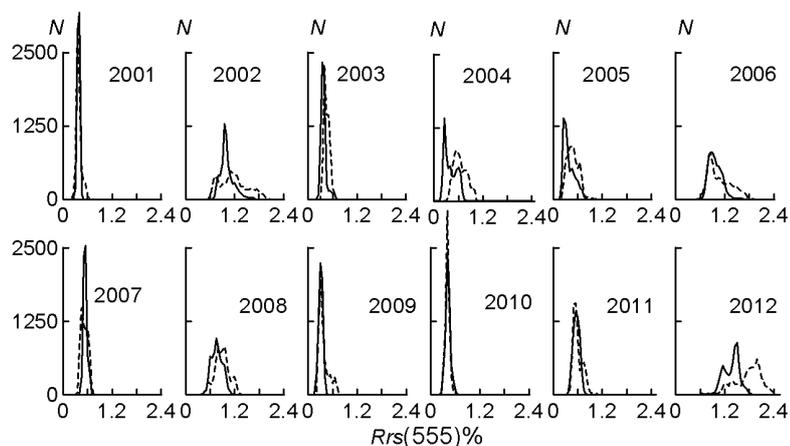
Рис. 1. Регионы черноморского бассейна для сравнительного анализа распределений Rrs . Тонкая сплошная и пунктир – изобаты 200 и 1400 м как условные границы шельфа и котловины. DD – основные водотоки дельты Дуная. W и E – западный и восточный регионы котловины Черного моря, NW – его северо-западный шельф с придунайской областью, Az – Азовское море

Результаты

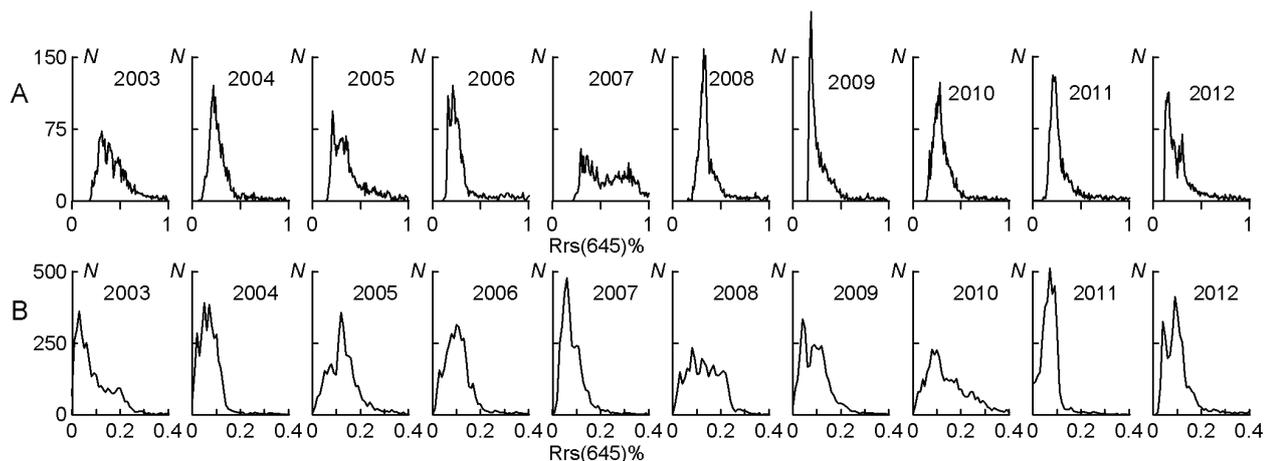
Гистограммы на *рис. 2* построены в единых масштабах по осям координат, обеспечивающих визуализацию структуры распределений Rrs в годы максимально интенсивного июньского максимума яркости. Поскольку все гистограммы заданного региона рассчитывались по выборкам оценок Rrs одного и того же объема (число ячеек сетки в границах региона), отсутствию июньской аномалии соответствуют гистограммы наибольшей амплитуды и наименьшей полуширины, близкие к началу координат, тогда как гистограммы минимальной амплитуды и наибольшей полуширины, максимально отстоящие от начала координат, характеризуют годы наивысших Rrs . По этим признакам нетрудно определить, что в 2001 и 2010 гг. аномалия не проявилась вовсе, тогда как в 2006 и 2012 гг. она достигала максимального развития.

Гистограммы на *рис. 2* демонстрируют сильную межгодовую перемежаемость распределений $Rrs(555)$ в пелагиали моря по величине оценок коэффициента яркости и диапазону их изменчивости. Они также свидетельствуют о наличии тренда, согласно которому различия распределений $Rrs(555)$ на западе и востоке пелагиали усаливались с ростом

амплитуды июньского максимума яркости. Отметим, что присутствие кокколитофорид в 2001 г. в пелагиали моря в концентрации ниже порога "цветения" является задокументированным фактом (Сокасар et al., 2004). Гистограммы $Rrs(645)$ отличались лишь деталями от аналогичных по времени распределений на *рис. 2* и потому не приводятся.



*Рис. 2. Гистограммы среднеиюньских распределений $Rrs(555)$ на акваториях W (сплошная) и E (пунктир) (см. *рис. 1*), рассчитанные по данным СЦО SeaWiFS (2001-2002 гг.) и СЦО MODIS-Aqua (2003-2012 гг.) с осреднением на регулярной сетке ячеек $3,6 \times 3,6$ км. N – число попаданий оценок Rrs в интервалы $Rrs_{(i+1)} - Rrs_{(i)} = 0,05\%$*



*Рис. 3. А - гистограммы $Rrs(645)$ в Азовском море (Az на *рис. 1*); В - гистограммы $Rrs(645)$ на северо-западном шельфе Черного моря (NW на *рис. 1*). N – число попаданий оценок Rrs в интервалы $Rrs_{(i+1)} - Rrs_{(i)} = 0,05\%$. Остальное - как на *рис. 2**

Межгодовая переменяемость оценок $Rrs(645)$ свойственна также акваториям Азовского моря и черноморского северо-западного шельфа. Однако она проявляется не столько в смещении диапазона зарегистрированных величин, сколько в изменении формы их распределения в фиксированных пределах. При этом мы не обнаружили признаков межгодовой изменчивости гистограмм на *рис. 3*, подобную тренду Rrs на акваториях пелагиали (W и E , *рис. 2*).

Характеристичность гистограмм на *рис. 2* позволяет разделить выборку данных СЦО MODIS на равновеликие подвыборки среднеиюньских Rrs фонового уровня (В) за 2001, 2003, 2007 и 2010 гг. и умеренного уровня (М) за 2004, 2005, 2006 и 2008 гг. и сравнить средние распределения Rrs подвыборок В и М со среднеиюньским распределением Rrs рекордно высокого уровня (R) 2012 г.

Гистограммы таких распределений для черноморских регионов (*рис. 1*) приведены на *рис. 4*. Они демонстрируют воспроизводимость различий в яркостном отклике западного и восточного регионов пелагиали на кокколитофоридное "цветение" и отсутствие признаков аналогичного отклика в случаях северо-западного шельфа и Азовского моря.

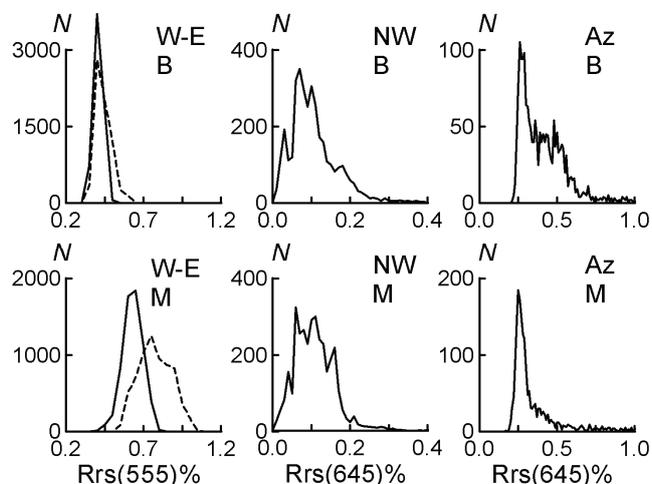
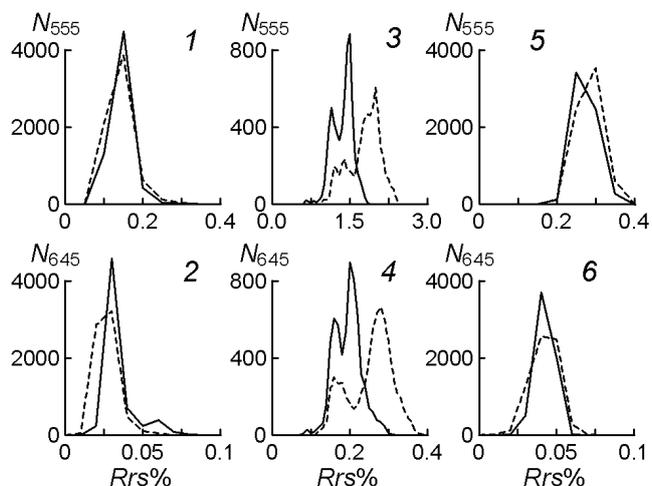


Рис. 4. Среднеиюньские распределения Rrs в западном (W, сплошная) и восточном (E, пунктир) регионах пелагиали, на черноморском северо-западном шельфе (NW) и в Азовском море (Az). N – число попаданий оценок Rrs в интервалы $Rrs_{(i+1)} - Rrs_{(i)} = 0,05\%$. Рассчитаны по четырехлетним подвыборкам фонового (В) и умеренно высокого (М) уровней Rrs



*Рис. 5. Гистограммы среднемесячных распределений $Rrs(555)$ (1, 3, 5) и $Rrs(645)$ (2, 4, 6) за апрель (1,2), июнь (3,4) и август (5,6) 2012 г. для регионов W (сплошная) и E (пунктир) котловины (*рис. 1*). N – число попаданий оценок Rrs в интервалы $Rrs_{(i+1)} - Rrs_{(i)} = 0,05\%$*

Гистограммы на *рис. 5* дают представление о соотношении оценок $Rrs(555)$ и $Rrs(645)$ за месяц до, во время и через месяц после рекордно мощного июньского максимума коэффициента яркости в 2012 г. Июньские оценки $Rrs(555)$ и $Rrs(645)$ существенно превысили верхний предел своей изменчивости в апреле, однако августовские $Rrs(645)$ оказались ближе к апрельским в большей степени, нежели аналогичные $Rrs(555)$. Эти факты подсказывают, что релаксация возмущения поля Rrs предельной амплитуды длится около месяца и что релаксация июньского максимума $Rrs(645)$ происходит быстрее относительно максимума $Rrs(555)$.

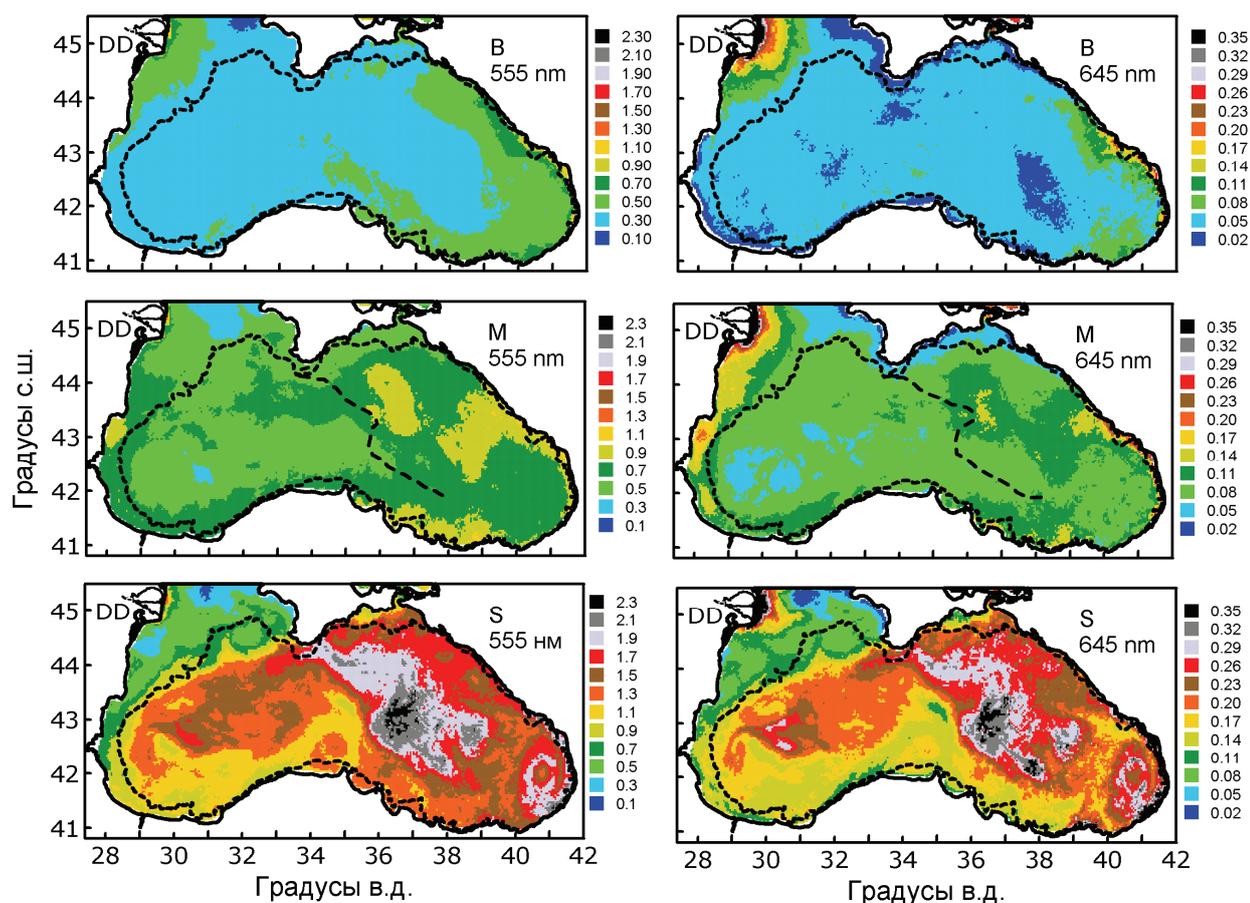


Рис. 6. Среднеиюньские распределения $Rrs(555)$ и $Rrs(645)$, рассчитанные по данным 2012 г. (S) и по четырехлетним подвыборкам данных фоновое (B) и умеренно высокого (M) уровней. DD - основные русла дельты Дуная. Мелкий пунктир – изобата 200 м, пунктирна кривая на картах M - яркостные фронты на картах S по границам между градациями 1,7-1,9 (S, 555 нм) и 0,26-0,29 (S, 645 нм), соответственно. Подробности – в тексте

Среднеиюньские распределения $Rrs(555)$ и $Rrs(645)$ на *рис. 6*, рассчитанные по данным "рекордного" 2012 г. (S) и по четырехлетним подвыборкам данных фоновое (B) и умеренно высокого (M) уровней, демонстрируют две закономерности: 1, июньский максимум Rrs достигает большей амплитуды на востоке пелагиали по сравнению с ее западной частью, что отражают и гистограммы Rrs на соответствующих рисунках; 2, наиболь-

шие Rrs в подвыборке М пришлось на область минимума Rrs в подвыборке В в центре восточной части пелагиали, а еще более мощные максимумы Rrs(555) и Rrs(645) 2012 года оказались смещенными к югу-западу от максимумов подвыборки М. Степень смещенности легко представить по пунктирным кривым на распределениях М, которые воспроизводят положение яркостных фронтов на картах S. Эти закономерности указывают на существенную пространственную неоднородность и непостоянство распределения факторов, контролирующих проявления июньских максимумов Rrs в пелагиали Черного моря.

Косвенное подтверждение реальности подобных структур в прошлом имеется в (Маньковский и др., 2009), где приведено распределение глубины видимости белого диска Z в июле 1992 г. в период массового цветения кокколитофорид в Черном море (рис. 3.11 (d) (Маньковский и др., 2009)). На рис. 7 приведена упрощенная копия этого распределения. Напомним, что белый диск, погружающийся в воду, становится невидимым, когда его яркость оказывается равной яркости фона. Чем выше концентрация водной взвеси, рассеивающей солнечный свет в атмосферу, тем меньше глубина, на которой выравниваются яркости диска и фона. При всех неточностях, присущих наблюдениям и картированию величины Z , пунктирная изолиния $Z = 6$ м между 32° и 38° в.д. уверенно разграничивает пелагиаль моря на области пониженных Z на востоке и повышенных – на западе (не считая полосу между берегом и 29° - 30° в.д.) подобно тому, как фронт, обозначенный пунктиром на картах М (рис. 6), разграничивает области пониженных Rrs на западе и повышенных – на востоке.

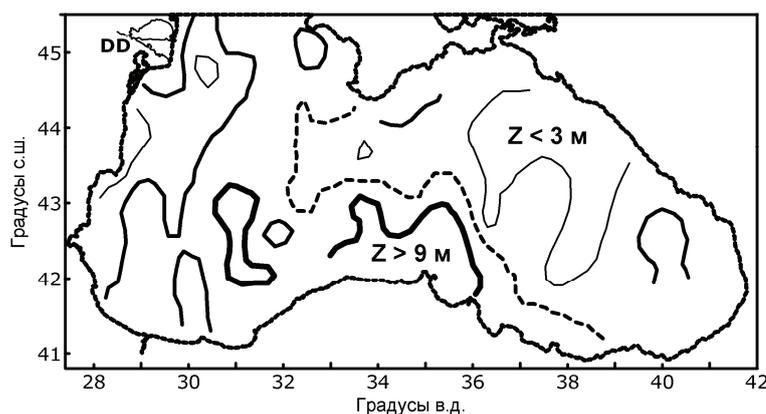


Рис. 7. Упрощенная карта глубины видимости белого диска Z , м, в Черном море в июле 1992 г. во время цветения кокколитофорид (по (Маньковский и др., 2009)). Тонкие, средние и жирные изолинии соответствуют $Z = 3, 6$ и 9 м. Пунктир – изолиния $Z = 6$ м, подобная пунктирной линии на картах М (рис. 6) по положению и разграничительной функции

Очевидное сходство ориентации и положения яркостного фронта и изолинии $Z = 6$ м на рис. 7 едва ли может быть случайным. Они наблюдались с разрывом в 20 лет с

использованием принципиально разных методов и подходов, но в условиях рекордно интенсивного "цветения" кокколитофорид. Указанное сходство означает воспроизводимость неравенства западной и восточной частей пелагиали по уровню Rrs в годы рекордно интенсивного "цветения" кокколитофорид.

Обсуждение результатов

Среднеиюньские гистограммы на *рис. 2* были построены благодаря возможности оперировать данными наблюдений декадной длительности, включая те, что были получены при концентрации кокколитофорид ниже порога их "цветения" 2001 г. (Сокасар et al., 2004) и при его рекордно мощном развитии в 2012 г. (Ясакова, Станичный, 2012). Форма гистограмм оказалась чувствительной не только к сезонным и региональным вариациям распределений Rrs, но и к менее очевидным местным особенностям поведения раннелетнего максимума Rrs в границах пелагиали Черного моря. Все это дает основание заключить, что гистограммы распределений Rrs способны служить объективным индикатором интенсивности межгодовых, обще- и внутрибассейновых вариаций такого природного явления, как раннелетний максимум Rrs в Черном море, явно связанный с "цветением" кокколитофорид.

Для реализации подхода важно найти начало отсчета, т.е. июньскую гистограмму Rrs в отсутствие "цветения" (точнее, при допороговой концентрации кокколитофорид). С этой целью мы пересчитали гистограммы четырехлетней подвыборки распределений фонового уровня (2001, 2003, 2007 и 2010 гг.) при шаге по Rrs(555) 0,02% вместо 0,05% и представили их на *рис. 8*.

Здесь гистограммы 2001 г. акваторий W и E едва различимы по амплитуде и полуширине, а их максимумы приурочены к $Rrs(555) = 0,41\%$ и $Rrs(555)\% = 0,38\%$ и находятся на минимальном удалении от начала оси абсцисс. Именно в 2001 г. в Черном море содержание кокколитофорид десятикратно уступало пороговой концентрации их "цветения" (Сокасар et al., 2004). Гистограмма 2003 г. для Rrs(555) тест-региона W похожа на обе гистограммы 2010 г. Однако гистограмма того же года в регионе E оказалась двухвершинной с максимумами на 0,40% и 0,54%. Гистограммы 2007 г. демонстрируют явный рост Rrs на обеих акваториях, причем более значительный на восточной по сравнению с западной. Поведение гистограмм фонового уровня Rrs(555) дает основание полагать, что гистограммы 2001 г. наиболее приемлемы в качестве долговременного минимума в климатологии изменчивости июньских Rrs на западе и востоке пелагиали Черного моря.

Уточнение формы гистограмм Rrs фонового уровня окончательно убедило в том, что этот инструмент описательной статистики эффективен как средство сравнительного анализа изменчивости распределений Rrs на акваториях черноморского региона во всем диапазоне амплитуд вплоть до редких эпизодов "цветения" кокколитофорид предельно высокой интенсивности.

Согласно гистограммам на *рис. 2* и *3*, межгодовая изменчивость июньских Rrs на акваториях NW и Az (*рис. 1*) не обнаруживает составляющей, подобной июньскому максимуму Rrs в пелагиали Черного моря. Этот результат согласуется с прежними наблюдениями на северо-западному шельфе Черного моря, где сезонный ход Rrs на ограниченном полигоне выглядел как беспорядочные колебания даже в те годы, когда в пелагиали моря фиксировался четкий июньский максимум Rrs (Карабашев и др., 2006). Вероятная причина в том, что водная толща периферийных мелководных регионов черноморского бассейна менее благоприятна для развития кокколитофорид по сравнению с пелагиалью по таким параметрам как устойчивость и прозрачность столба воды.

Распределения Rrs 2012 г. отличают две особенности. Во-первых, после рекордного июньского максимума Rrs в июне августовские гистограммы Rrs(555) и Rrs(645) различаются по своей смещенности относительно "исходного" положения в апреле (*рис. 5*). Направленность различий позволяет утверждать, что июньский максимум в красной области спектра (645 нм) релаксировал быстрее по сравнению с максимумом на длине волны 555 нм. Естественное объяснение состоит в том, что в Черном море толщина слоя формирования восходящей яркости в пелагиали достигает 10-15 м для Rrs(555), но не превышает 2-3 м для Rrs(645) из-за сильного поглощения красного излучения собственно водой. Поэтому отмершие частицы биогенной взвеси оседают из слоя формирования красной яркости за меньшее время по сравнению с зеленой областью (555 нм). Смещенность максимума гистограммы региона E относительно региона W на графике *рис. 5*, характерная для всех июньских данных, также говорит в пользу нашего истолкования.

Во-вторых, все июньские гистограммы 2012 г. в пелагиали оказались двухвершинными, сохранив при этом смещенность гистограмм восточной области относительно западной в сторону больших Rrs. Двухвершинность указывает на повышенную неоднородность распределения Rrs на водной поверхности и означает, что часть градаций Rrs промежуточного уровня встречалась в пелагиали реже более высоких и низких градаций. Такая картина свойственна, например, пространственным распределениям с внутренними границами раздела (фронтами), по обе стороны от которых рассматриваемая величина распределена более однородно. Действительно, карты S на *рис. 6* демонстрируют наличие яркостных фронтов, о чем уже было сказано выше при обсуждении карт. Скорее всего,

незначительные различия контуров и местоположения фронтов обусловлены особенностями взаимодействия солнечного излучения различного спектрального состава с водной средой и потому правильнее говорить о единственном фронте.

Он ориентирован приблизительно по направлению с северо-запада на юго-восток и делит пелагиаль на северо-восточную область повышенных Rrs и юго-западную - пониженных. С обнаружением этого фронта стало ясно, что вышеприведенные гистограммы занижают различия уровней Rrs по его сторонам, поскольку на север региона W распространяется часть акватории повышенных Rrs , а юго-запад региона E частично занят пониженными Rrs , характерными для региона W . Однако это уточнение не отменяет сам факт повышенного уровня Rrs на условно-восточной акватории E относительно Rrs на условно-западной акватории W во всем диапазоне амплитуд июньского максимума Rrs , за исключением картин 2001 и 2010 гг., близких климатологическому нулю июньского максимума (рис. 8).

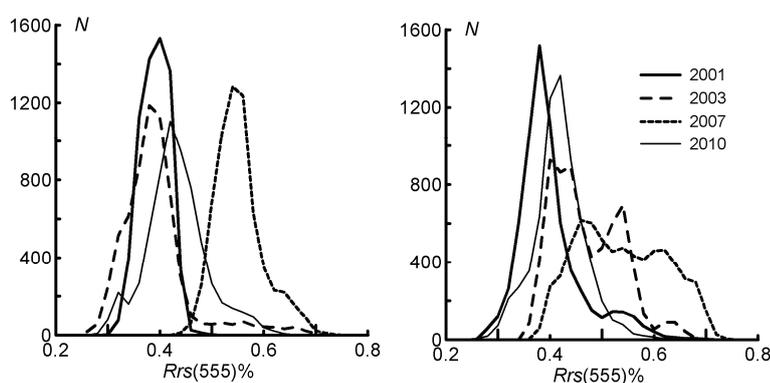


Рис. 8. Среднеиюньские гистограммы $Rrs(555)$ фоновое уровня (2001, 2003, 2007 и 2010 гг.) при разрешении 0.02%. Слева - для акватории W , справа - для акватории E на рис. 1. Пояснения - в тексте

Скорее всего, существует среднесуточный тренда опережающего развития июньского максимума Rrs на северо-востоке Черного моря относительно его юго-западной части. Это различие усиливается с ростом суммарной амплитуды максимума, а наибольшие Rrs оказываются приуроченными к глубоководной восточной части моря (карты M и S на рис. 6). Вместе с тем на карте B рис. 6 максимальные Rrs приурочены к восточному побережью на $43^{\circ}\pm 30'$ в.д. Складывается впечатление, что "цветение" здесь стартует, а затем распространяется преимущественно на северо-запад. Поначалу оно почти не реагирует на циклоническое ОЧТ (Основное Черноморское Течение) над континентальным склоном, но, пройдя 44° с.ш., вовлекается северной ветвью ОЧТ и проникает западнее 34° в.д., занимая главным образом северную часть западной котловины Черного моря. Эта гипотетическая картина нуждается в проверке и уточнении, ведь максимальный

температура размножения клеток кокколитофорид достигает 2,8 делений за сутки (Tuytell, Merico, 2004) и gross-структура "цветения" может определяться не столько динамикой вод как таковой, сколько распределением факторов роста этих водорослей.

Заключение

При изучении акваторий фиксированной площади и очертаний амплитуда максимума гистограммы и его положение на оси абсцисс однозначно характеризовали степень развитости июньского максимума Rrs, а форма гистограммы указывала на особенности конкретного распределения Rrs. Выявление крупномасштабной неоднородности распределений Rrs в Черном море по характеристикам гистограмм указывает на перспективность их применения в качестве простого количественного показателя неоднородности распределения естественных примесей в море по спутниковым данным в меньших масштабах вплоть до 20-30 км.

Появление яркостного фронта около СЗ-ЮВ румбов, сопутствующего июньскому максимуму Rrs в Черном море, не является чем-то экстраординарным постольку, поскольку фронты подобной ориентации встречаются в распределениях других характеристик верхнего слоя Черного моря. Кроме примера прямого сходства с распределением глубины видимости белого диска в июле 1992 г. (см. выше, *рис. 7*), заслуживает упоминания широтная асимметрия среднемноголетнего поля толщины ВКС в Черном море (*рис. 2.28* в (Гертман, 1991)), а также среднегодовое распределение толщины черноморского ВКС, построенное с помощью численной модели и представленное в виде карты на *рис. 4d* в (Kara et al., 2005). Здесь 11-метровая изолиния, осциллирующая относительно направления СЗ-ЮВ, отделяет западную часть пелагиали с ВКС толщиной 12-15 м от восточной, где его толщина убывает до 8-10 м и менее. Меньшая толщина ВКС на востоке означает большую устойчивость столба воды и, следовательно, более благоприятные условия для "цветения" кокколитофорид. Однако нам не удалось найти результаты прямых определений подобных характеристик-предпосылок "цветения" требуемого объема и достоверности.

Для более строгого понимания механизма и черноморской специфики формирования июньского максимума яркости требуются дальнейшие исследования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-05-00441-а).

Литература

1. Гертман И.Ф. Поверхности раздела в структуре деятельного слоя моря // Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. Л.: Гидрометеоздат, 1991. С. 170-175.
2. Карабашев Г.С., Шеберстов С.В., Якубенко В.Г. Июньский максимум нормализованной яркости и его связь с гидрологическими условиями и цветением кокколитофорид в Черном море // Океанология. 2006. Т. 46. № 3. С. 331-343.
3. Копелевич О.В., Буренков В.И., Вазюля С.В., Шеберстов С.В. Проблемы индикации кокколитофоридных цветений по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 241-250.
4. Макеева Л.П. Облачность и солнечное сияние // Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. т. IV. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоздат, 1991. С. 57-68.
5. Маньковский В.И., Маньковская У.В., Соловьев М.В. Гидрооптические характеристики Черного моря. Справочник. Севастополь: МГИ НАН Украины. 2009. 90 с.
6. Титов В.Б. Формирование верхнего конвективного слоя и холодного промежуточного слоя в Черном море в зависимости от суровости зим // Океанология. 2004. Т. 44. № 3. С. 354-357.
7. Ясакова О.Н., Станичный С.В. Аномальное цветение *Emiliana huxleyi* (Prymnesiophyceae) в Чёрном море в 2012 г. // Морський екологічний журнал. 2012. Т. 11. № 4. С. 54.
8. Burenkov V.I., Kopelevich O.V., Pautova L.V., Prokhorenko O.V., Rusakov V.Yu., Sheberstov S.V. Possible causes of the increased content of suspended particles in the northeastern part of the Black Sea in June // Oceanology. 2005. V.45. Suppl. 1. P. 39-50.
9. 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.
10. Iglesias-Rodriguez, M.D., Brown, C. W., Doney, S. C., Kleypas, J., Kolber D., Kolber Z., Hayes P.K., Falkowski P.G. Representing key phytoplankton functional groups in ocean carbon cycle models: coccolithophorids // Global Biogeochem. Cycles. 2002. V. 16. # 4. P. 47-1-47-20. doi:10.1029/2001GB001454.
11. Kara A.B., Wallcraft A.J., Hurlburt H.E. A new solar radiation penetration scheme for use in ocean mixed layer studies: an application to the Black Sea using a fine-resolution Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM) // Journal of Physical Oceanography. 2005. V. 35. No. 1. P. 13-23. doi: http://dx.doi.org/10.1175/JPO2677.1.
12. Tyrrell T., Merico A. *Emiliana huxleyi*: bloom observations and the conditions that induce them // *Coccolithophores*. From Molecular Processes to Global Impact. Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag. 2004. P. 76-97.

Variability of the June reflectance maximum in the Black Sea according to decadal satellite data

G.S. Karabashev, M.A. Evdoshenko

*P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
E-mail: genkar@mail.ru*

A study is made of the coccolithophore blooms occurring in the Black Sea from late May to early July. The blooms enable one to monitor the vital activity of algae in aquatic environment by satellite means thanks to the multiple enhancement of the sea surface reflectance. We used the data of ocean color scanners SeaWiFS and MODIS-Aqua from 2001 to 2012 placing more emphasis on variations of reflectance in 2012, the year of extraordinary powerful blooming. According to comparative analysis of reflectance changes within the four ecologically-different testing regions, the blooming covers solely the deep-water basin, features considerable spatial inhomogeneity, and peaks in the east of the sea. It is shown that the manifestations of blooming relax faster in the longwave range of the visible spectrum than in its middle part which is most probably due to the difference of thicknesses of layers where the ascending radiances of shorter and longer wavelength originate. Our findings refine the patterns of coccolithophore blooming in the Black Sea and must be taken into account when interpreting the early-summer images of the basin.

Keywords: remote sensing, coccolithophore bloom, the Black Sea, long-term variability, the June anomaly of reflectance.

References

1. Gertman I.F. Poverhnosti razdela v strukture dejatel'nogo sloja morja (Interfaces in the active layer structure of the sea), *Gidrometeorologija i gidrohimiya morej SSSR. Vol. 4. Chernoe more. No. 1. Hidrometeorologicheskie uslovija*, Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991, pp. 170-175.
2. Karabashev G.S., Sheberstov S.V., Jakubenko V.G. Ijun'skij maksimum normalizovanoj jarkosti i ego svjaz' s gidrologicheskimy uslovijami i cveteniem kokkolitoforid v Chernom more (The June maximum of the normalized radiance and its relation to hydrological regime and coccolithophore blooming in the Black Sea), *Okeanologija*, 2006, Vol. 46, No. 3, pp. 331-343.
3. Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Vazjulja S.V., Sheberstov S.V. Problemy indikacii kokkolitoforidnyh cvetenij po sputnikovym dannym (Problems of indication of coccolithophore blooms from the satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 5, pp. 241-250.
4. Makeeva L.P. Oblachnost' i solnechnoe sijanie (Cloudiness and sunshine) *Gidrometeorologija i gidrohimiya morej SSSR. Vol. 4. Chernoe more. No. 1. Hidrometeorologicheskie uslovija*, Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 1991, pp. 57-68.
5. Man'kovskij V.I., Man'kovskaja U.V., Solov'ev M.V. *Gidroopticheskie harakteristiki Chernogo morja. Spravochnik* (The hydrooptical characteristics of the Black Sea. Handbook), Sevastopol': MGI NAN Ukrainy, 2009, 90 p.
6. Titov V.B. Formirovanie verhnego konvektivnogo sloja i holodnogo promezhutochnogo sloja v Chernom more v zavisimosti ot surovosti zim (Origination of the upper convective layer and cool intermediate layer in the Black Sea depending on the severity of winters), *Okeanologija*, 2004, Vol. 44, No. 3, pp. 354-357.
7. Jasakova O.N., Stanichnyj S.V. Anomal'noe cvetenie *Emiliana huxleyi* (Prymnesiophyceae) v Chjornom more v 2012 g (Anomalous blooming of *Emiliana huxleyi* (Prymnesiophyceae) in the Black Sea in 2012), *Mors'kij ekologichnij zhurnal*, 2012, Vol. 11, No. 4, p. 54.
8. Burenkov V.I., Kopelevich O.V., Pautova L.V., Prokhorenko O.V., Rusakov V.Yu., Sheberstov S.V. Possible causes of the increased content of suspended particles in the northeastern part of the Black Sea in June, *Oceanology*, 2005, Vol. 45, Suppl. 1, pp. 39-50.
9. Cokacar T., Oguz.T., Kubilay N. Satellite-detected early summer coccolithophore blooms and their interannual variability in the Black Sea, *Deep-Sea Res.*, 2004, Vol. 51, No. 8, pp. 1017-1031.
10. Iglesias-Rodriguez, M.D., Brown, C. W., Doney, S. C., Kleypas, J., Kolber D., Kolber Z., Hayes P.K., Falkowski P.G. Representing key phytoplankton functional groups in ocean carbon cycle models: coccolithophorids, *Global Biogeochem. Cycles*, 2002, Vol. 16, No. 4, pp. 47-1-47-20, doi:10.1029/2001GB001454.
11. Kara A.B., Wallcraft A.J., Hurlburt H.E. A new solar radiation penetration scheme for use in ocean mixed layer studies: an application to the Black Sea using a fine-resolution Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM) , *Journal of Physical Oceanography*, 2005. Vol. 35, No. 1, pp. 13-23, doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JPO2677.1>.
12. Tyrrell T., Merico A. *Emiliana huxleyi*: bloom observations and the conditions that induce them // *Coccolithophores. From Molecular Processes to Global Impact*, Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag, 2004, pp. 76-97.