

Спектральные признаки цветения цианобактерий в Балтийском море по данным сканера MODIS

Г.С. Карабашев, М.А. Евдошенко

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

Москва 117997, Россия

E-mail: genkar@mail.ru

Спектральные особенности «цветения» цианобактерий в Балтийском море исследовались по данным сканера MODIS после репроцессинга 2009–2010 гг. Для сравнения использовались данные, полученные с помощью того же сканера в Черном море в 2012 г. во время рекордно мощного «цветения» кокколитофорид. Они лишены дополнительных пигментов, свойственных цианобактериям, и вместе с тем превосходят последние по интенсивности проявлений «цветения» в поле обратно-рассеянной солнечной радиации. Выбор акваторий и времени спутниковых наблюдений «цветения» осуществлялся по опубликованным результатам определений клеток фитопланктона в верхнем слое моря. Наряду с оценками спектральных коэффициентов яркости водной поверхности R_{rs} в качестве новых спутниковых показателей «цветения» использовались две производные характеристики: индекс цвета $S_x = 100 \times R_{rs}(667) / R_{rs}(555) \%$ как мера крутизны спада длинноволнового крыла спектра R_{rs} , оценка длины волны L_{max} максимума спектра R_{rs} , рассчитанная с помощью интерполяции кубическими сплайнами значений R_{rs} на длинах волн 469, 488, 531, 547, 555 нм. Изменчивость этих характеристик во время «цветений» в Черном и Балтийском морях сравнивалась на одинаковых пространственных масштабах при сравнимых значениях оценок R_{rs} . Типизация спектров R_{rs} методом К-средних использовалась для выявления связи между их формой и амплитудой с развитием «цветения». Показано, что во время «цветения» цианобактерий в спектре коэффициента яркости Балтийского моря происходят изменения, предположительно обусловленные дополнительными пигментами цианобактерий и/или их прижизненными выделениями. Специфичность таких изменений подтверждается тем, что они отсутствуют в спектрах коэффициента яркости Черного моря во время «цветения» кокколитофорид, которым не свойственны подобные пигменты и выделения. Обсуждаются возможности дистанционной диагностики «цветения» цианобактерий на основе обнаруженных спектральных эффектов.

Ключевые слова: цветение цианобактерий, Балтийское море, спектр коэффициента яркости, MODIS

Введение

«Цветение» фитопланктона (одноклеточных водорослей) проявляется как сезонное возмущение поля яркости поверхности водных бассейнов и определяется ускорением деления клеток при наступлении благоприятных условий. «Цветение» цианобактерий снижает рекреационную привлекательность водных бассейнов и приводит к появлению токсинов в его водах (Вершинин, Орлова, 2008). Не удивительно, что дистанционное зондирование Земли из космоса оказалось востребованным как средство обнаружения и слежения за событиями «цветения» фитопланктона в океане и водоемах суши, непревзойденное по синоптичности и регулярности своих данных. При всех успехах методов дистанционной диагностики цветений развитие спутникового подхода к проблеме цветений остается актуальным для удовлетворения потребностей природопользования.

Настоящая работа посвящена развитию диагностики «цветений» фитопланктона во внутренних морях по данным мультиспектрального зондирования водной поверхности с околоземной орбиты. Оно основано на регистрации коэффициента яркости моря R_{rs} в видимой области спектра от 400 до 700 нм несколькими спектральными каналами на длинах волн λ и осуществляется с помощью спутниковых сканеров цвета океана (СЦО) типа SeaWiFS, MODIS, MERIS и др. Более совершенный гиперспектральный подход принципиально уступает мультиспектральному.

тиспектральной технике по площади визируемой акватории и повторяемости ее съемки, что критически важно для океанологических применений ДЗ. Существенно также, что в Интернете свободно доступны глобальные данные СЦО за несколько десятилетий, перспективные для изучения климатологии водных бассейнов (например, портал <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>).

Цель работы – исследовать информативность спектров коэффициента яркости моря R_{rs} , определяемых по данным СЦО MODIS после репроцессинга 2009–2010 гг., когда номинальные длины волн λ каналов сканера в видимой области составили ряд 412, 443, 469, 488, 531, 547, 555, 645, 667 и 678 нм. Сине-зеленый интервал λ с новыми каналами принадлежат участку видимого спектра, где длина волны максимума L_{max} спектра R_{rs} меняется при смешении вод с различным содержанием окрашенных растворенных органических веществ (CDOM в мировой литературе). На том же участке находятся полосы светопоглощения каротеноидов и фикобилинов, известных как дополнительные пигменты цианобактерий. Таким образом, расширение номенклатуры каналов СЦО MODIS повысило ценность его данных для дистанционной индикации смешения вод и предельно высоких концентраций водорослей в приповерхностной толще водных бассейнов по характеристикам спектров R_{rs} . Было показано, что сплайн-интерполяция оценок R_{rs} каналами сканера MODIS между 469 и 555 нм позволяет оценивать L_{max} с точностью, приемлемой для картирования этой характеристики, и применять ее как объективный показатель цветности вод (Karabashev, Evdoshenko, 2015).

Полоса флуоресценции фикоцианина с максимумом на 650 нм (Aiken, 2001) способна усиливать оценку $R_{rs}(667)$, и потому индекс цвета $C_x = 100 \times R_{rs}(667)/R_{rs}(555)$ мог бы служить показателем обилия цианобактерий, поскольку $R_{rs}(555)$ не зависит от наличия окрашенных примесей в морской воде. Не исключено, что $R_{rs}(645)$ способен лучше отслеживать присутствие фикоцианина. Однако в составе СЦО MERIS и SeaWiFS нет аналогичного канала, но реализуемы близкие комбинации $R_{rs}(665)/R_{rs}(560)$ и $R_{rs}(670)/R_{rs}(555)$, что позволило бы использовать архивные материалы этих сканеров аналогично данным MODIS'а, если будет доказана информативность индекса C_x .

В качестве третьей характеристики мы рассмотрим форму спектров R_{rs} , восстановленную по данным девяти каналов СЦО MODIS от 443 до 678 нм с помощью сплайн-интерполяции. Разумеется, интерполяция не заменит инструментальные определения спектров R_{rs} , но интерполированные спектры могут быть полезны как индикатор трендов пространственно-временных вариаций спектрального хода коэффициента яркости моря там, где он зависит от поглощения и флуоресценции пигментов фитопланктона и продуктов его жизнедеятельности.

Материалы и методы

Вся полнота картины «цветений», регистрируемой на спутниковых изображениях водной поверхности, не поддается воспроизведению экспериментальными или теоретическими моделями вследствие сложности связей между множеством релевантных непосто-

янных факторов. В лаборатории невозможно проверить, в какой степени поглощение света фикобилинами смещает L_{max} , поскольку цветение цианобактерий в море сопровождается выделением растворенной органики, действующей на L_{max} аналогичным образом. Изображения «цветений» нередко выглядят как контрастные переплетения струеподобных образований, грибовидных фигур, спиралей и прочих структур, свидетельствующих об эволюции «цветений» на фоне активного перемешивания приповерхностного слоя бассейна. В этих условиях крайне трудно обеспечить достоверность подспутниковых определений состава и количеств естественных примесей в слое формирования восходящей яркости из-за несоответствия темпа отбора проб воды с борта судна (иного не дано!) практически мгновенной фиксации спектрально-яркостных контрастов на спутниковом изображении акватории протяженностью в десятки и сотни миль. Список подобных трудностей почти бесконечен.

Для достижения цели мы сопоставляем предлагаемые характеристики «цветений», рассчитанные по изображениям Балтийского и Черного морей. Балтийское море известно как место почти ежегодных «цветений» цианобактерий. Они активно исследуются океанологами балтийского региона под эгидой комиссии HELCOM (Baltic Marine Environment Protection Commission – Helsinki Commission). Руководствуясь материалами, представленными на ее портале (Wasmund et al., 2013), мы выбрали полигон в Восточной Готландской впадине, где в июле 2005 г. между 54° и 59° в.д. наблюдалось одно из самых интенсивных «цветений» балтийских цианобактерий за время эксплуатации современных СЦО.

В Черном море «цветения» кокколитофорид происходят в течение раннелетнего периода, существенно меняясь по интенсивности от года к году (Карабашев, Евдошенко, 2014). Рекордно интенсивное «цветение» черноморских кокколитофорид состоялось в 2012 г., охватив практически все пространство в пределах континентального склона моря. Определения фитопланктона и оптических свойств этой акватории во время «цветения» 2012 г. (Ясакова, Станичный, 2012) подтвердили прямую связь между рекордностью проявлений «цветения» в поле яркости и обилием кокколитофорид в верхнем слое моря. Сравнивая поведение предлагаемых характеристик яркостного сигнала СЦО на балтийском полигоне в 2005 г. и в пелагиали Черного моря в 2012 г., мы имеем дело с определениями R_{rs} сопоставимой амплитуды в водах, существенно различных по условиям формирования яркостного сигнала. Они обусловлены региональными особенностями водорослей как примесей, генерирующих сигнал, и оптических свойств среды, в которой он распространяется к поверхности моря.

Наша работа основана на анализе отдельных изображений моря, полученных в приосевой части полосы обзора СЦО в отсутствие облачности. Наличие опубликованных данных о месте, времени и интенсивности цветения водорослей требуемого видового состава в период функционирования СЦО MODIS служило главным критерием выбора изображений. Судя по материалам комиссии Helcom (см. выше), Балтийское море намного лучше отвечает такому критерию по сравнению с иными акваториями морей и океанов, где случаются цветения цианобактерий. Существенно также, что «цветения» кокколитофорид не наблюдались в Балтийском море (Tyrrell et al., 2008), а цианобактерии

не «цветут» в Черном море. При этом периоды их «цветений» не перекрываются массовым размножением фитопланктона иного видового состава. Все это позволяет оперировать архивными материалами без обращения к подспутниковым наблюдениям по крайней мере на рекогносцировочном этапе исследований.

Результаты

Распределения R_{max} и L_{max} на *рис. 1, 2* демонстрируют отклик этих характеристик на «цветение» кокколитофорид в Черном море и цианобактерий – в Балтийском. Трех-четырёхкратный рост оценок R_{max} в пределах котловины Черного моря в июне 2012 г. относительно апреля практически не проявился в распределении оценок L_{max} , на что указывает неизменность набора градаций L_{max} в пределах 200-метровой изобаты на картах L_{max} *рис. 1*. Напротив, рост R_{max} в июле относительно апреля в 2005 г. на ЮВ Балтики сопровождался ростом оценок L_{max} на 10–15 нм с апреля по июль (*рис. 2*). Эти распределения свидетельствуют также о большем разнообразии масштабов неоднородностей поля яркости, порождаемых «цветением» цианобактерий по сравнению с «цветением» кокколитофорид.

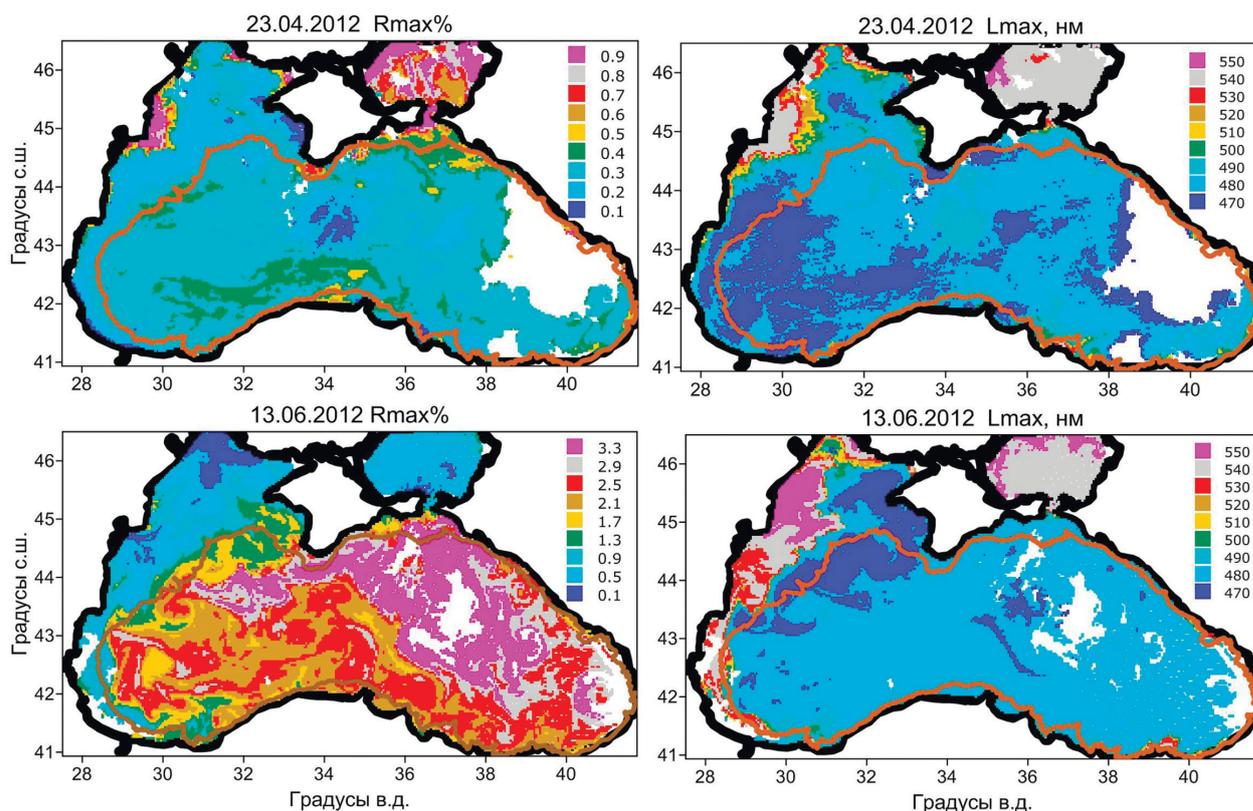


Рис. 1. Распределения оценок коэффициента яркости R_{max} в максимуме его спектра и длины волны максимума этого спектра L_{max} , рассчитанные по данным СЦО MODIS-Aqua с осреднением на равномерной сетке ячеек $3,6 \times 3,6$ км для изображений Черного моря задолго до (23.04.2012) и во время (13.06.2012) рекордно интенсивного цветения кокколитофорид, происходившего там с мая по июль 2012 г. Коричневый контур (изобата 200 м) показывает внешнюю границу шельфа. Подробности – в тексте

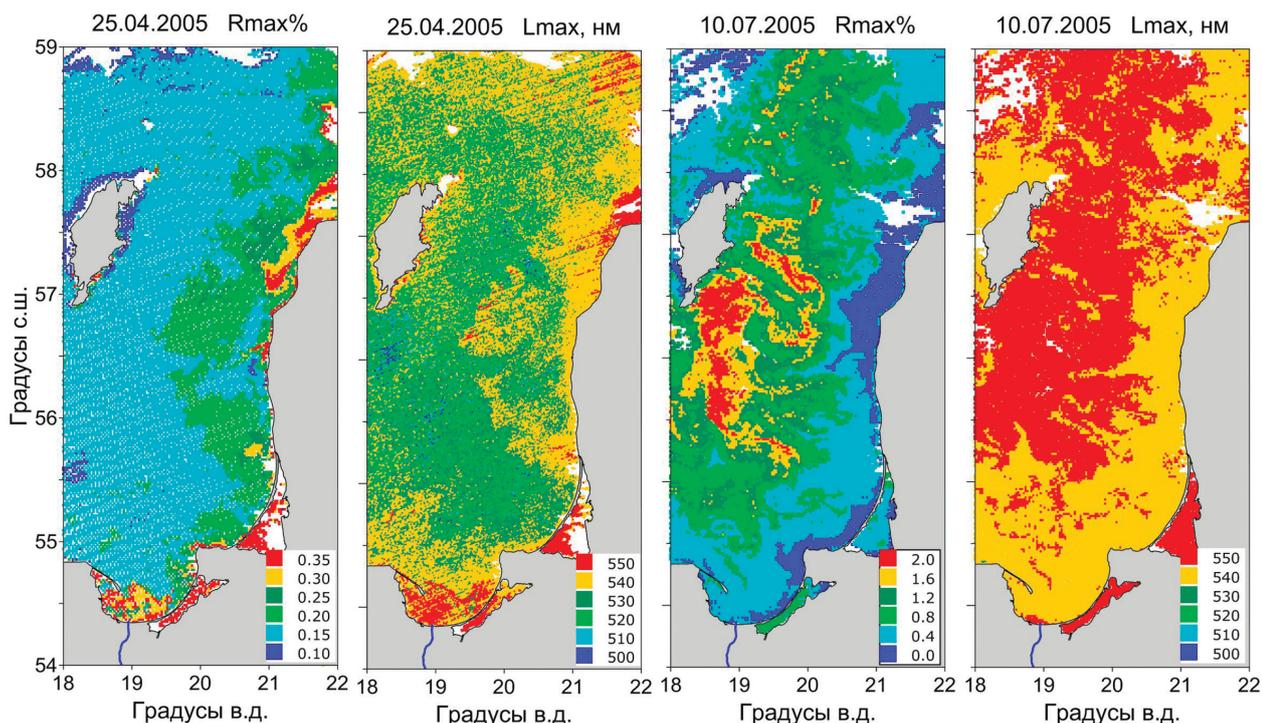


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, но на востоке и юго-востоке Балтийского моря задолго до (25.04.2005 г.) и во время (10.07.2005 г.) «цветения» цианобактерий в 2005 г. Суша между 18°–19° в.д. и 57°–58° с.ш. – о-в Готланд

Более четкое представление о различии структуры «цветений» дают меридиональные профили их характеристик на рис. 3. Они построены по данным на балтийской и черноморской трассах одинаковой протяженности с одинаковым пространственным разрешением. При слабом сигнале R_{rs} в отсутствие «цветения» профили характеристик демонстрируют хаотичные неоднородности, несогласованные по месту и амплитуде (графики 01.04.2005). В разгар «цветения» цианобактерий (графики 10.07.2005) неоднородности оценок S_x во многом повторяют форму профиля R_{max} , тогда как оценки L_{max} смещаются на 15–20 нм к красному пределу спектра, не обнаруживая подобия с меридиональным ходом R_{max} и S_x . Черноморский профиль оценок R_{max} сравним с балтийским по соотношению переменной составляющей с постоянным пьедесталом, отличаясь от балтийского практически полным отсутствием мелкомасштабной составляющей.

Типизации спектров R_{rs} вдоль разрезов рис. 3 с помощью метода К-средних (Айвазян и др., 1989) позволила разделить выборку спектров пикселей разреза на К кластеров в соответствии с критерием малости внутрикластерной дисперсии по сравнению с межкластерной в 9-мерном пространстве переменных (оценок R_{rs} на длинах волн каналов СЦО с $R_{rs}(443)$ по $R_{rs}(678)$). Замена наблюдаемых спектров пикселей средними спектрами (центроидами) соответствующих кластеров упрощает анализ пространственной изменчивости спектрального хода R_{rs} (Karabashev et al., 2006). Результат расчетов при $K=8$ приведены на рис. 4 в виде трех групп центроидов, ранжированных по возрастанию $R_{rs}(555)$.

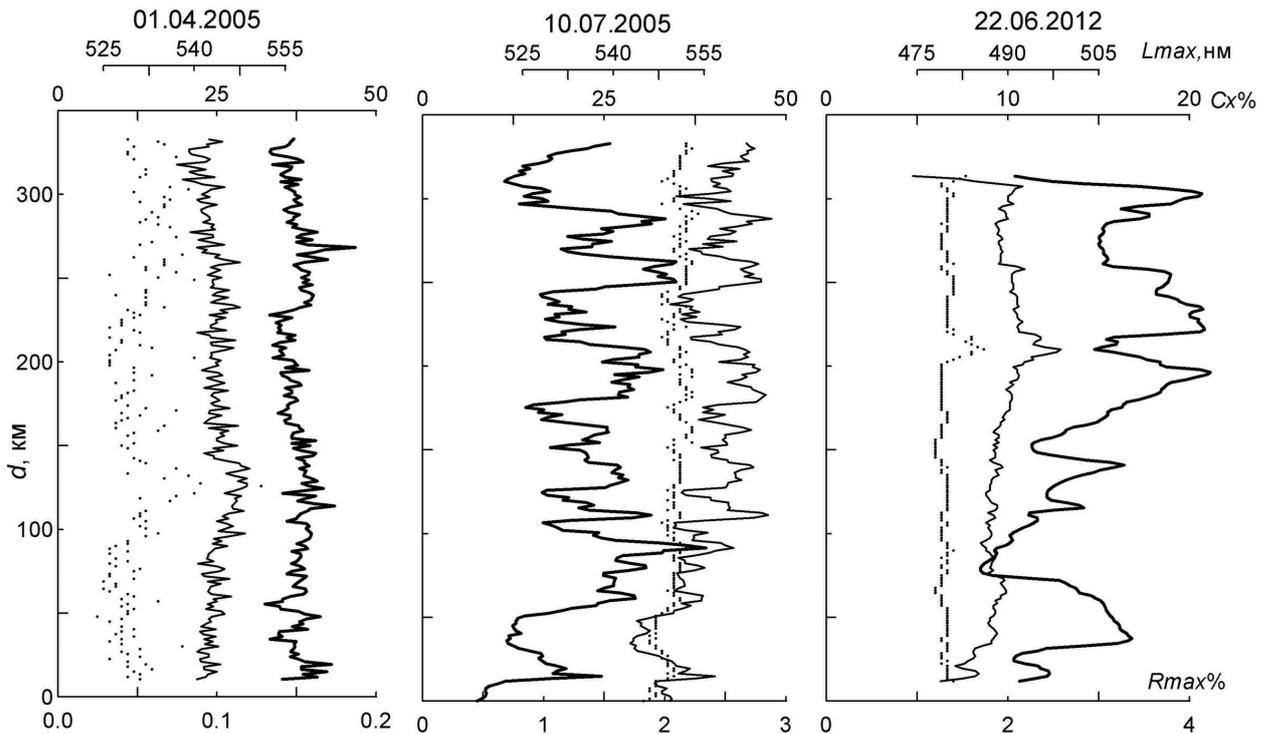


Рис. 3. Профили коэффициента яркости R_{max} % (сплошная жирная), индекса цвета $C_x \% = 100 \times R_{rs}(667) / R_{rs}(555)$ (сплошная тонкая) и длины волны максимума спектра L_{max} , нм (точки), рассчитанные по данным СЦО MODIS-Aqua от 01.04.2005 и 10.07.2005 на меридиане 1930' в.д. в Балтийском море между 55° и 58° с.ш. и по данным от 22.06.2012 на меридиане 35° в.д. в Черном море между 42° и 45° с разложением 1,5 км

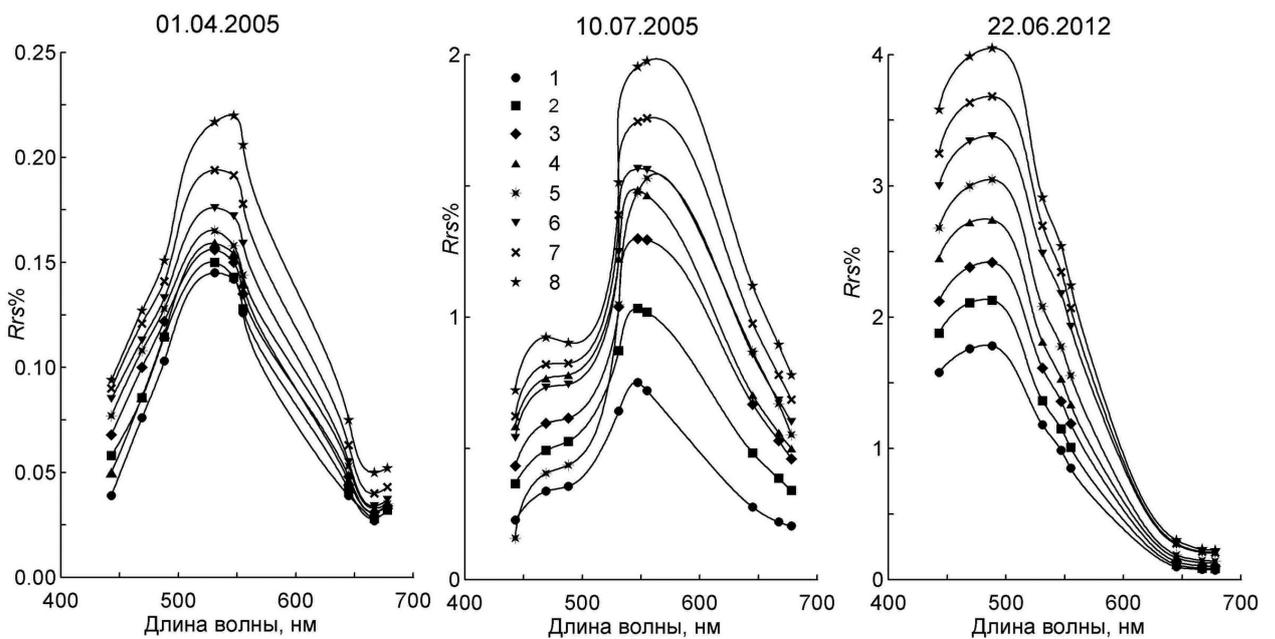


Рис. 4. Средние спектры (центроиды кластеров спектров R_{rs}), ранжированные по $R_{rs}(555)$ и найденные методом К-средних по данным девяти каналов СЦО MODIS-Aqua от 443 до 678 нм для каждого профиля на рис. 3 при $K=8$. Сплошные контуры – сплайн-интерполяция центроидов

Типичные спектры балтийского профиля в отсутствие «цветения» цианобактерий демонстрируют сдвиг длины волны максимума с ростом амплитуды яркостного сигнала от 531 до 547 нм (графики 01.04.2005). Единообразие формы центроидов при более чем двукратном изменении их амплитуды отличает типичные спектры Rrs во время рекордно интенсивного цветения кокколитофорид (графики 22.06.2012). Здесь максимумы центроидов всех кластеров тяготели к 488 нм.

Амплитуда и форма центроидов оказались максимально разнообразными в условиях «цветения» «цианобактерий» (профиль 10.07.2005 г.). Пик младшего центроида пришелся на 547 нм, длина волны максимума старшего центроида превысила 555 нм. При этом длинноволновое крыло спектра усиливалось вместе с ростом Rrs в максимуме центроидов на фоне явного отставания роста амплитуды коротковолнового крыла между 443 и 531 нм. На графиках 10.07.2005 г. видно, что разность $difB = Rrs(488) - Rrs(469)$ монотонно убывает во всем диапазоне изменчивости пиковых оценок Rmax и уступ на коротковолновом крыле спектра Rrs превращается в минимум около 500 нм. Естественно предположить, что появление отрицательных $difB$ при наибольших Rmax характерно не только для спектров вдоль профиля на 19°30' в.д.

Предположение проверялось на примере MODIS-изображений балтийского полигона от 16.07.2003 г. и 10.07.2005 г. с проявлениями цветений цианобактерий неодинаковой интенсивности и конфигурации. Распределения оценок Rrs(555) и $difB$, найденных для каждого пикселя изображений без осреднения по времени или пространству, приведены на *рис. 5*.

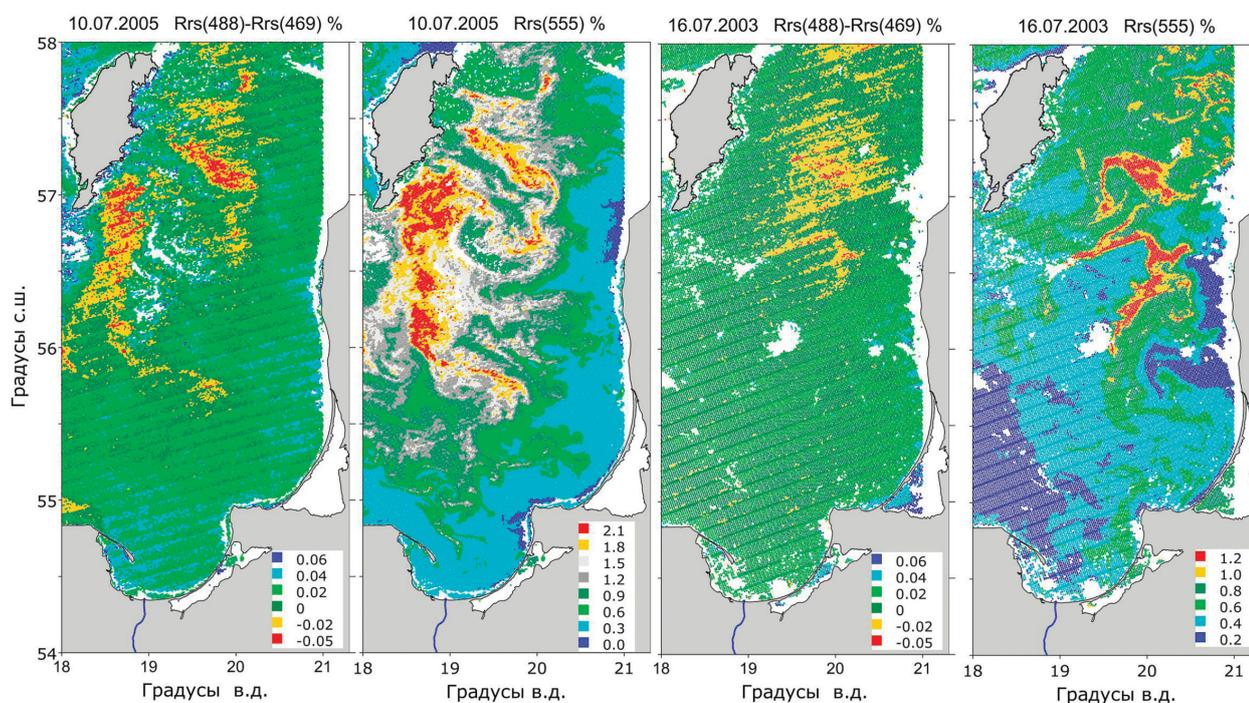


Рис. 5. Распределения разностей Rrs(488)–Rrs(469) и Rrs(555) на юго-востоке Балтийского моря в разгар цветения цианобактерий 10 июля 2005 г. и 16 июля 2003 г., рассчитанные по данным СЦО MODIS-Aqua уровня L2 без осреднения и интерполяции атрибутов пикселей приемлемого качества. Подробности – в тексте

Меньшая определенность локализации минимальных $difB$ по сравнению с наибольшими $Rrs(555)$ явно обусловлена повышенными погрешностями определения разностей Rrs по сравнению с определениями самих Rrs . Тем не менее в обоих случаях разности $difB < 0$ имели место там же, где наблюдались максимальные $Rrs(555)$.

Обсуждение результатов

Наши результаты подтверждают возможность диагностики «цветений» фитопланктона по характеристикам формы спектра коэффициента яркости, найденным по данным мульти-спектрального СЦО с учащенными каналами регистрации яркостного сигнала в средней части видимого спектра. Возможности реализуемы, если в клетках «цветущего» планктона имеются дополнительные пигменты, чье светопоглощение и/или флуоресценция вносят вклад в формирование спектра Rrs . Это условие не соблюдается в случае «цветения» черноморских кокколитофорид, т.к. даже в условиях рекордно интенсивного «цветения» 2012 г. имеющийся в них хлорофилл не проявился в спектрах $Rrs(\lambda)$ по поглощению как провал около 440 нм или по флуоресценции как пик на 678 нм (*рис. 4*). И это при том, что условия наблюдений спектральных эффектов на Черном море гораздо благоприятнее, чем на Балтике, благодаря гораздо меньшему содержанию CDOM в черноморских водах относительно балтийских. Именно поэтому фоновые L_{max} составляют 520–550 нм в открытой Балтике против неизменных 480–490 нм в Черном море (спектры 01.04.2005 и 22.06.2012 на *рис. 4*). Причина в том, что провал и пик слишком слабы на фоне мощного отражения света панцирями клеток кокколитофорид.

Минимум Rrs на 500 нм за счет поглощения хлорофилла невозможен, т.к. максимум его коротковолнового поглощения (полосы Core) приходится на 440 нм. Минимум на 500 нм необъясним избыточным поглощением света растворенной органикой, так как оно монотонно убывает с длиной волны излучения. Имеются указания на возможность максимумов поглощения в окрестностях 500 нм такими вспомогательными пигментами цианобактерий, как каротеноиды (Hirschberg, Chamowitz, 1994) и фикоэритрин (Aiken, 2001). Нам не удалось найти сведения о присутствии таких соединений в составе цианобактерий, ответственных за «цветение» вод Восточной Готландской впадины.

Изменчивость формы спектров Rrs на акватории «цветения» цианобактерий (спектры 10.07.2005 на *рис. 4*) объяснима сочетанием ее зависимости от пигментов и прижизненных выделений цианобактерий с сильной неоднородностью их горизонтального распределения. Обратная связь между интенсивностью «цветения» (оценками Rrs в максимумах центроидов на графиках 10.07.2005 на *рис. 4*) и разностью $Rrs(488) - Rrs(469)$ указывает на возможность восстановления концентраций пигментов и/или выделений по спутниковым данным. Мы не нашли литературные данные об оптических свойствах цианобактерий и их выделений во время «цветения», необходимые для такого восстановления. Источником подобных данных могли бы быть подспутниковые определения состава и содержания цианобактерий с учетом специфики их пространственно-временной изменчивости.

Согласно (Stal et al., 2003), в открытой Балтике обычно «цветут» крупные цианобактерии *Nodularia* and *Aphanizomenon*, обладающие пузырьками газа для управления плавучестью. *Aphanizomenon* строят плотно упакованные колонии длиной до нескольких миллиметров. *Nodularia* формируют колонии подобного размера, но менее плотной упаковки, и образуют агрегаты с поперечником до 10 см. Они заселяются диатомовыми, зоопланктоном и бактериями и быстрее разрушаются турбулентностью по сравнению с агрегатами *Aphanizomenon*. Благодаря пузырькам газа и образованию агрегатов *Nodularia* and *Aphanizomenon* скапливаются на поверхности при тихой погоде в виде полос тины на поверхности моря, способных дрейфовать далеко от места зарождения. При развитом перемешивании цианобактерии равномерно заполняют водную толщу, но вновь всплывают к поверхности по окончании перемешивания. Скорость всплытия колоний *Aphanizomenon* и *Nodularia* составляет 22 и 36 м в сутки, соответственно, так что они всплывают в течение суток после перемешивания вплоть до глубины термоклина (20–25 м).

Судя по изображениям поверхности моря в разгар «цветения», (например, *рис. 1* в (Stal et al., 2003)), масштаб перемежаемости скоплений цианобактерий и «чистой» воды может составлять всего несколько метров. С борта судна скопления кажутся объемными образованиями, но их действительный вертикальный поперечник может быть много меньше горизонтального в силу известной анизотропии перемешивания в природных водоемах. Управляемая плавучесть цианобактерий способствует уплощению и уплотнению их скоплений. Последнее порождает опасность самозатенения нижележащих слоев скоплений вышележащими и, как следствие, нелинейность зависимости сигнала СЦО от содержания цианобактерий, если вероятность уплотненных приповерхностных скоплений игнорируется (например, при взятии проб с поверхности моря ведром во время подспутниковых наблюдений).

Ясно, что обращение к архивным данным подспутниковых наблюдений количества и состава цианобактерий имеет смысл лишь при наличии описания процедур отбора и обработки проб. Ясно также, что эти трудности преодолимы только ценой дополнительных затрат труда и времени. Фактор времени особенно важен на умеренных и высоких широтах, где характеристики водной и воздушных сред, от которых зависит успех ДЗ, отличаются повышенной изменчивостью. Интервал времени между пролетом сканера и моментом отбора проб воды, считающийся приемлемым при подспутниковом определении состава и количества, например, кокколитофорид, может оказаться недопустимо длинным в случае цианобактерий. Неадекватность однократного отбора проб при наличии локальных скоплений цианобактерий подчеркнута в (Kutser, 2004).

В свете изложенного имеет смысл исследовать изменчивость вышеназванных спектральных эффектов по архивным данным СЦО MODIS за 2003–2014 гг. в Балтийском море с привлечением материалов сопутствующих наблюдений характеристик среды. Знание изменчивости эффектов будет способствовать оптимизации подспутниковых наблюдений, необходимых для восстановления характеристик цианобактерий по данным ДЗ. Столь же важно изучать закономерности изменчивости спектров Rrs, неотягощенных погрешностями атмосферной коррекции. Такие спектры регистрируются гиперспектральными спектрорадиометрами на плавающих

или авиа носителях. Проявления полос поглощения и флуоресценции фикоцианина уверенно наблюдались в спектрах подповерхностного коэффициента яркости моря, зарегистрированно-го таким прибором во время «цветения» цианобактерий во внутренней части Финского залива (Vazyulya et al., 2014). Вместе с тем эти спектры не имели признаков минимума около 500 нм. Его отсутствие могло быть следствием слабости влияния дополнительных пигментов на фоне поглощения CDOM, гораздо более сильного относительно Готландской впадины.

Сравним теперь вышеописанные спектральные отличия цветений цианобактерий и кокколитофорид с цветными изображениями балтийской и черноморской акваторий, построенными по данным MODIS в RGB-модели цветовоспроизведения по версии 24-битного цвета TrueColor («подлинный цвет»), применяемой в компьютерной графике. Пример таких изображений из архива <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/FEATURE/gallery.html> представлен на *рис. 6*. Голубовато-бирюзовые оттенки поверхности Черного моря хорошо согласуются с оценками $L_{max} < 500$ нм, характерными для неоднородностей цветения кокколитофорид (правый график на *рис. 4*), а зеленовато-желтоватые оттенки поверхности восточной Балтики отвечают $L_{max} \geq 547$ нм (средний график там же). Однако различия цветности акваторий объясняются не особенностями окраски организмов «цветения», а сдвигом «окна прозрачности» балтийских вод в сторону красной границы спектра вследствие усиленного поглощения коротковолновой солнечной радиации природными CDOM, содержание которых в верхнем слое Балтийского моря намного выше, чем верхней толщии Черного моря. «Цветение» цианобактерий приводит лишь к сдвигу L_{max} на 15–20 нм (ср. спектры на левом и среднем графиках *рис. 4*), но он едва ли достаточен для диагностически значимого изменения цветности балтийских вод.

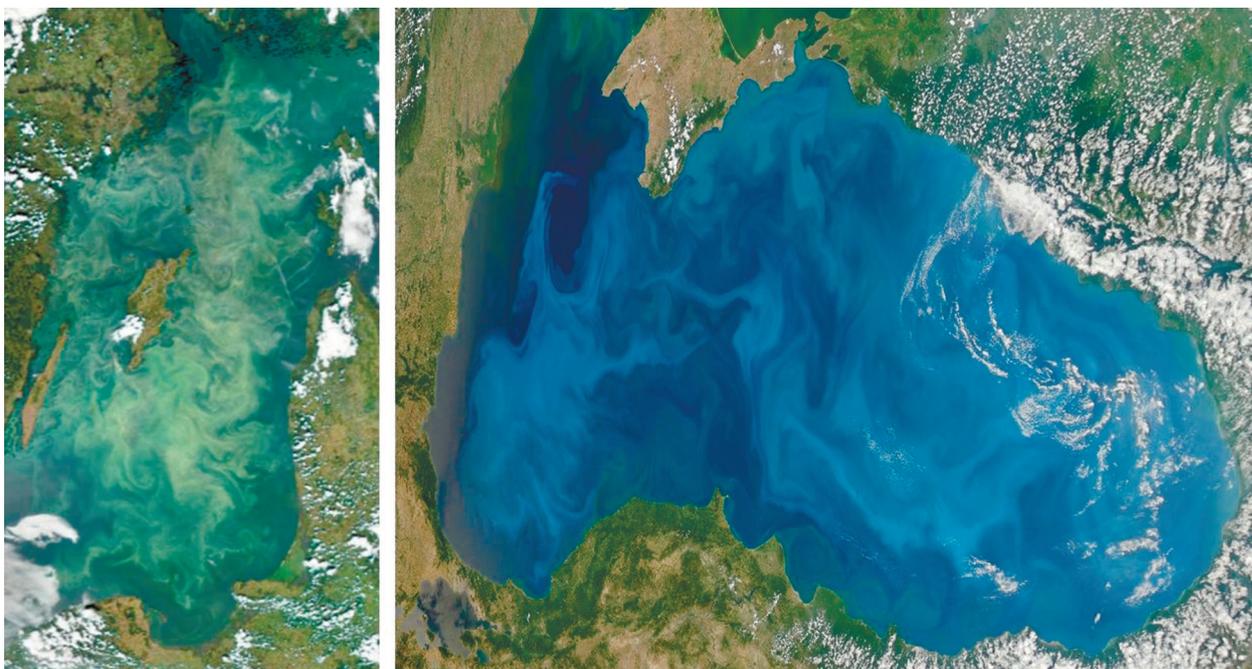


Рис. 6. Изображения балтийской (слева, июль 2005 г.) и черноморской (справа, июль 2012 г.) акваторий, построенные по данным сенсора MODIS-Aqua в RGB-модели цветовоспроизведения по версии 24-битного цвета TrueColor («подлинный цвет»). Загружены из архива <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/FEATURE/gallery.html>

Напротив, элементы тонкой структуры в виде минимумов и «уступов» спектрального хода Rrs около 488 нм (средний график там же) перспективны как диагностический признак «цветения» цианобактерий, на что указывают их сезонный ход, подобие распределений оценок Rrs(555) и *difB*, а также спектральное соответствие тонкой структуры максимумам поглощения солнечной радиации некоторыми пигментами цианобактерий.

Заключение

Результаты применения одинаковых приемов анализа к данным ДЗ из регионов с радикально различающимися популяциями водорослей придают уверенность в том, что эффекты «цветения» цианобактерий, выявленные в Балтийском море, реальны и заслуживают дальнейшего изучения с прицелом на реализацию спектральной диагностики подобных «цветений». Преимущество такой диагностики перед методами, основанными на подборе эмпирических зависимостей оценок Rrs от содержания пигментов, состоит в том, что она основана на физическом эффекте и универсальна в той степени, в какой сам эффект независим от условий среды. Ответ на этот вопрос – тема дальнейших исследований. Они должны строиться с учетом трудностей подспутниковых определений цианобактерий в море (Kahru et al., 2007) и целесообразности апробации иных, более адекватных характеристик интенсивности эффектов (например, дефицит площади коротковолнового крыла спектра Rrs вместо разности *difB*).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект 14-17-00451).

Литература

1. Айвазян С.А., Бухтитабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности. Справочное издание под ред. С.А. Айвазяна. М.: Финансы и статистика, 1989. С. 607.
2. Вершинин А.О., Орлова Т.Ю. Токсичные и вредные водоросли в прибрежных водах России // Океанология. 2008. Т. 48. № 4. С. 568–582.
3. Карабашев Г.С., Евдошенко М.А. Изменчивость июньского максимума коэффициента яркости Черного моря по спутниковым данным декадной длительности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 28–41.
4. Карабашев Г.С., Евдошенко М.А. О сезонной изменчивости максимума спектра коэффициента яркости Черного моря по спутниковым данным // Океанология. 2015. Т. 55. № 2. С. 182–191.
5. Ясакова О.Н., Станичный С.В. Аномальное цветение *Emiliania huxleyi* (Prymnesiophyceae) в Чёрном море в 2012 г. // Морський екологічний журнал. 2012. Т. 11. № 4. С. 54.
6. Aiken J. Fluorometry for biological sensing // Encyclopedia of Ocean Sciences. Waltham: Academic Press. 2001. P. 1073–1081.
7. Hirschberg J., Chamowitz D. Carotenoids in Cyanobacteria // The Molecular Biology of Cyanobacteria. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 1994. P. 559–579.
8. M. Kahru M., Savchuk O.P., Elmgren R., Satellite measurements of cyanobacterial bloom frequency in the Baltic Sea: interannual and spatial variability // Marine Ecology Progress Series, 2007, Vol. 343, P. 15–23, doi: 10.3354/meps06943.
9. Karabashev G. S., Evdoshenko M.A., Sheberstov S. V. Normalized radiance spectrum as a water exchange event diagnostic // International Journal of Remote Sensing. 2006. Vol. 27. No. 9–10, P. 1775–1792.
10. Kutser T. Quantitative detection of chlorophyll in cyanobacterial blooms by satellite remote sensing // Limnol. Oceanogr. 2004. Vol. 49. No. 6. P. 2179–2189.
11. Stal L.J., Albertano P., Bergman B., von Broeckel K., Gallon J.R., Hayes P. K., Sivonen K., Walsby A.E. BASIC: Baltic Sea cyanobacteria. An investigation of the structure and dynamics of water blooms of cyanobacteria in the Baltic Sea—responses to a changing environment // Continental Shelf Research. 2003. Vol. 23. No. 17–19. P. 1695–1714.

12. Tyrrell T., Schneider B., Charalampopoulou A., Riebesell U. Coccolithophores and calcite saturation state in the Baltic and Black Seas // *Biogeosciences*. 2008. Vol. 5. No. 2. P.485–494.
13. Vazyulya S., Khrapko A., Kopelevich O., Burenkov V., Eremina T., Isaev A. Regional algorithms for the estimation of chlorophyll and suspended matter concentration in the Gulf of Finland from MODIS-Aqua satellite data // *Oceanologia*. 2014. Vol. 56. No. 4. P. 737–756.
14. Wasmund N., Busch S., Gromisz S., Högländer H., Jaanus A., Johansen V., Jurgensone I., Karlsson C., Kownacka J., Kraśniewski W., Olenina I. Cyanobacteria biomass // HELCOM Baltic Sea Environment Fact Sheet. 2013. Online. 17–Feb–15, <http://www.helcom.fi/baltic-seatrends/environment-fact-sheets/>.

Spectral features of cyanobacterial bloom in the Baltic Sea from MODIS data

G.S. Karabashev, M.A. Evdoshenko

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

The spectral features of cyanobacteria blooms in the Baltic Sea are examined based on the MODIS data reprocessed in 2009–2010. For reference, we used the data of same sensor acquired in the Black Sea during the most powerful blooming of coccolithophores in the Black Sea in 2012. They are deprived of accessory pigments of cyanobacteria, and surpass the latter in intensity of manifestations of blooming in the field of the backscattered solar radiation. The aquatic areas and time of satellite observations has been chosen according to published results of determinations of phytoplankton abundance in the upper layer of the seas. In addition to the estimates of spectral reflectance R_{rs} of water surface, two derivative characteristics served as new satellite indicators of blooms: the color index $C_x = 100 \times R_{rs}(667)/R_{rs}(555)\%$ as an index of steepness of the longwave wing of the R_{rs} spectrum and the estimates of wavelength L_{max} of maximum R_{rs} calculated by means of cubic spline interpolation of R_{rs} at wavelengths 469, 488, 531, 547, and 555 nm. The variability of these characteristics was compared during blooms in the Black and Baltic Seas on equal spatial scales at R_{rs} levels of one and the same range. Classification of R_{rs} spectra using the K-means method was applied to reveal the relation of their shape and amplitude to the development of blooming. We demonstrate that the reflectance spectrum of the Baltic Sea exhibits changes during the cyanobacterial bloom which are hypothetically due to the accessory pigments of cyanobacteria and/or to the excretion of dissolved organic matter by the latter. The specificity of these changes is corroborated by the fact that they are lacking in the case of bloom of the coccolithophores. Possibilities of remote diagnostics of cyanobacteria blooms on the basis of spectral effects discovered are discussed.

Keywords: cyanobacteria blooming, Baltic Sea, reflectance spectrum, MODIS

References

1. Aivazyan S.A., Bukhtshtaber V.M., Enyukov I.S., Meshalkin L.D. *Prikladnaya statistika: Klassifikatsiya i snizhenie razmernosti* (Applied statistics: Classification and dimensionality reduction), Moscow: Finansy i statistika, 1989, 607 p.
2. Vershinin A.O., Orlova T. Yu. Toksichnye i vrednye vodorosli v pribrezhnykh vodakh Rossii (Toxic and harmful algae in coastal waters of Russia), *Okeanologiya*, 2008, Vol. 48, No. 4, pp. 568–582.
3. Karabashev G.S., Evdoshenko M.A. Izmenchivost' iyun'skogo maksimuma koeffitsienta yarkosti Chernogo morya po sputnikovym dannym dekadnoi dlitel'nosti (Variability of the June reflectance maximum in the Black Sea according to decadal satellite data), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 3, pp. 28–41.
4. Karabashev G.S., Evdoshenko M.A. O sezonnoi izmenchivosti maksimuma spektra koeffitsienta yarkosti Chernogo morya po sputnikovym dannym (On the seasonality of the wavelength maximum of reflectance spectrum of the Black Sea according to satellite Data), *Okeanologiya*, 2015, Vol. 55, No. 2, pp. 182–191.
5. 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 ekologicheskii zhurnal*, 2012, Vol. 11, No. 4, p. 54.
6. Aiken J. Fluorometry for biological sensing, *Encyclopedia of Ocean Sciences*, Waltham: Academic Press, 2001, pp. 1073–1081.
7. Hirschberg J., Chamowitz D. Carotenoids in Cyanobacteria, *The Molecular Biology of Cyanobacteria*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1994, pp. 559–579.

8. M. Kahru M., Savchuk O.P., Elmgren R., Satellite measurements of cyanobacterial bloom frequency in the Baltic Sea: interannual and spatial variability, *Marine Ecology Progress Series*, 2007, Vol. 343, pp. 15–23, doi: 10.3354/meps06943.
9. Karabashev G. S., Evdoshenko M.A., Sheberstov S. V. Normalized radiance spectrum as a water exchange event diagnostic, *International Journal of Remote Sensing*, 2006, Vol. 27, No. 9–10, pp. 1775–1792.
10. Kutser T. Quantitative detection of chlorophyll in cyanobacterial blooms by satellite remote sensing, *Limnol. Oceanogr.*, 2004, Vol. 49, No. 6, pp. 2179–2189.
11. Stal L.J., Albertano P., Bergman B., von Broeckel K., Gallon J.R., Hayes P. K., Sivonen K., Walsby A.E. BASIC: Baltic Sea cyanobacteria. An investigation of the structure and dynamics of water blooms of cyanobacteria in the Baltic Sea—responses to a changing environment, *Continental Shelf Research*, 2003, Vol. 23, No. 17–19, pp. 1695–1714.
12. Tyrrell T., Schneider B., Charalampopoulou A., Riebesell U. Coccolithophores and calcite saturation state in the Baltic and Black Seas, *Biogeosciences*, 2008, Vol. 5, No. 2, pp. 485–494.
13. Vazyulya S., Khrapko A., Kopelevich O., Burenkov V., Eremina T., Isaev A. Regional algorithms for the estimation of chlorophyll and suspended matter concentration in the Gulf of Finland from MODIS-Aqua satellite data, *Oceanologia*, 2014, Vol. 56, No. 4, pp. 737–756.
14. Wasmund N., Busch S., Gromisz S., Högländer H., Jaanus A., Johansen V., Jurgensone I., Karlsson C., Kownacka J., Kraśniewski W., Olenina I. Cyanobacteria biomass, *HELCOM Baltic Sea Environment Fact Sheet*, 2013, Online 17–Feb–15, <http://www.helcom.fi/baltic-seatrends/environment-fact-sheets/>.