Коротковолновые минимумы коэффициентов яркости водной поверхности как спутниковый показатель «цветений» *Nodularia spumigena* на юге Каспийского моря

Г.С. Карабашев, М.А. Евдошенко

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

На примере цветений цианобактерий 2005 и 2010 гг. в Каспийском море уточняются возможности дистанционной индикации подобных событий по дефициту восходящей яркости водной поверхности. Он обусловлен коротковолновыми максимумами поглощения света хлорофиллом и дополнительными пигментами. Мерой дефицита служат индексы хлорофилла D1 = Rrs(443) - Rrs(412) и дополнительных пигментов D2 = Rrs(488) - Rrs(488)- Rrs(469), где Rrs - оценки коэффициентов яркости сканером MODIS на длинах волн 412, 443, 469 и 488 нм. В условиях цветения D1и D2 принимают отрицательные значения. Указанные цветения наилучшим образом соответствуют замыслу работы, поскольку они эволюционировали на фоне мезомасштабного вихря на акватории, свободной от влияния внешних источников оптически-значимых примесей. Определяя концентрацию хлорофилла a chlLOO по MODIS-снимкам цветения с помощью регионального алгоритма (Копелевич и др., 2013), мы установили, что индекс D1, рассчитанный по тем же снимкам, связан сильной обратной линейной связью с содержанием этого пигмента в диапазоне от 0,5 до 5–6 мг м⁻³. Сравнение временного хода встречаемости индексов D1 < 0 и D2 < 0 на фиксированном участке цветения за периоды с января 2004 и 2009 гг. по декабрь 2005 и 2010 гг. показало, что они практически отсутствовали весной и ранним летом, заполняя участок в годы цветения в августе-октябре. При этом рост числа пикселей с D2 < 0 начинался раньше роста населения пикселей с D1 < 0. Подобная последовательность наблюдалась и в период цветения цианобактерий в 2005 г. в Балтийском море. Как показало сравнение распределений оценок коэффициента яркости Rrs(555), концентрации хлорофилла a chl a по стандартному алгоритму MODIS, хлорофилла chlLOO по региональному алгоритму и концентрации хлорофилла chlD1, найденной по линейной регрессии D1 на chlLOO, распределение chlDl не реагировало на прибрежный максимум мутности в отличие от первых трех характеристик. В целом, наши результаты подтверждают целесообразность разработки спектрально-разностного алгоритма определения хлорофилла по данным сканеров цвета океана в зонах цветения водорослей, поскольку разностный сигнал в меньшей степени зависит от факторов, не связанных с пигментами растительного происхождения.

Ключевые слова: цветение цианобактерий, Каспийское море, хлорофилл, дополнительные пигменты, алгоритмы дистанционного определения хлорофилла, сканер MODIS

> Одобрена к печати: 12.12.2016 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-1-159-174

Введение

Было показано (Карабашев, Евдошенко, 2015; Karabashev, Evdoshenko, 2015, 2016), что цветению распространенных водорослей в океане сопутствуют минимумы спектров коэффициента яркости Rrs водной поверхности на длинах волн максимумов поглощения солнечного излучения хлорофиллом *a* (443 нм) и дополнительными пигментами (488 нм) (Wozniak, Dera, 2007). Мультиспектральный сканер цвета океана (МСЦО) MODIS perистрирует коэффициенты яркости на длинах волн 412, 443, 469, 488, 531, 547 и 555 нм. Это позволило предложить индексы D1= Rrs(443) – Rrs(412) и D2 = Rrs(488) – Rrs(469) в качестве меры дефицита обратно-рассеянной солнечной радиации, обусловленного присутствием указанных пигментов в воде. Во внутренних морях, включая Каспийское море, Rrs растет с длиной волны излучения λ при $\lambda < 500$ нм. В этих условиях и при заданном выше определении индексов они тем отрицательнее, чем больше пигментов содержится в воде и значительнее дефицит восходящей яркости в пиках поглощения света пигментами. Используя локальный алгоритм определения содержания хлорофилла в водах Каспийского моря по данным MCЦО (Kopelevich et al., 2013), мы показали, что индекс D1 обратно пропорционален хлорофиллу *а* в диапазоне его концентраций от 0,5 до 5 мг м⁻³ при коэффициенте детерминации $R^2 = 0,9$ (Karabashev, Evdoshenko, 2016). Последнее означает, что концентрация хлорофилла в воде была практически единственным доминирующим фактором изменчивости индекса D1 при том, что соответствующие коэффициенты яркости Rrs(443) и Rrs(412) зависели не столько от этого пигмента, сколько от обилия окрашенной растворенной органики естественного происхождения (CDOM), взвешенных частиц разной природы, ошибок атмосферной коррекции и прочих условий, контролирующих уровень и спектральный ход оценок Rrs. По нашему мнению, высокая избирательность индекса объясняется тем, что вычитание спектрально близких оценок Rrs существенно ослабляет влияние непигментных факторов благодаря малости их спектральной селективности по сравнению с селективностью светопоглощения пигментами.

Южный Каспий оказался первой акваторией, где возможность дистанционного определения концентрации хлорофилла по проявлениям его коротковолнового светопоглощения в спектре коэффициента яркости моря получила экспериментальное подтверждение. Наряду с наличием выверенного локального алгоритма восстановления концентрации хлорофилла по оценкам Rrs посредством различных МСЦО (Kopelevich et al., 2013) здесь благоприятно то, что в 2005 г. цветение цианобактерии Nodularia spumigena развивалось на фоне эволюции мощного мезомасштабного вихря вне прибрежий и мелководий. Последнее обеспечило широкий диапазон оценок исследуемых величин на сравнительно малой акватории при минимальном влиянии непигментных факторов. Спустя несколько лет здесь же состоялось аналогичное цветение пониженной интенсивности, зарегистрированное теми же МСЦО. По совокупности обстоятельств эти южно-каспийские цветения привлекли нас как природные явления, позволяющие развить представления о закономерностях изменчивости спектрально-разностных индексов содержания хлорофилла и дополнительных пигментов и уточнить диагностический потенциал таких индексов в сравнении с освоенными спутниковыми показателями морских цветений. Настоящая работа посвящена реализации этих возможностей.

Подходы, материалы и методы

Все цветения летне-осеннего сезона в регионе объясняются ускоренным делением клеток цианобактерии *Nodularia sp.* в верхнем слое глубоководной котловины Южного Каспия (Soloviev, 2005; Nasrollahzadeh et al., 2011; Moradi, 2014). Исходя из этих сведений, мы загружали цифровые изображения южно-каспийского региона, полученные с помощью МСЦО MODIS Aqua и MERIS в период цветений и доступные на портале NASA (http:// oceancolor.gsfc.nasa.gov/) в виде продуктов уровня L2. Данные MERIS (GSD = 300 m) предназначались в основном для уточнений картины цветений при отсутствии MODIS-данных. Среди последних использовались оценки Rrs на длинах волн $\lambda = 412$, 443, 469, 488, 531, 547, 555, 645, 667 и 678 нм и концентрации хлорофилла chl_а согласно универсальному MODIS-алгоритму. Предпочтительность MODIS-данных обусловлена тем, что MERIS оснащен меньшим числом каналов, необходимых для расчета индексов цветения.

Загруженные изображения района работ подвергались предварительной обработке с помощью системы подготовки и анализа данных SMCS (Шеберстов, 2015). Она поддерживает пакетную обработку и визуализацию данных МСЦО, позволяет контролировать качество данных посредством флагов и масок, а также экспортировать результаты обработки в различных форматах. Предварительная обработка данных завершалась удалением недоброкачественных пикселей из выбранных изображений.

Учитывая ненадежность универсальных алгоритмов расчета концентрации пигментов во внутренних морях по спутниковым оценкам Rrs (Blondeau-Patissier et al., 2014), мы рассчитывали также содержание хлорофилла *a* chlLOO в Каспийском море, пользуясь региональным алгоритмом

chlLOO = 0,573 (
$$R_{rs}(488)/R_{rs}(555)$$
)^{-2,39}. (1)

Он был создан в Лаборатории оптики океана ИО РАН на основе синхронных подспутниковых определений концентрации хлорофилла в пробах воды и Rrs водной поверхности в Центральном и Северном Каспии с помощью плавающего спектрорадиометра (Kopelevich et al., 2013). Зависимость индекса цветения от концентрации хлорофилла D1(chlLOO) была найдена по данным MODIS от 1 сентября 2005 г. (день года 244, период кульминации цветения) на зональном профиле длиной более 200 км с использованием усреднения исходных Rrs в ячейках регулярной сетки 2×2 км.

Мы воспользовались данными MODIS за 2004–2005 и 2009–2010 гг., чтобы выявить особенности сезонного хода индексов в годы цветения (2005 и 2010 гг.) и в предшествующие им годы без признаков цветения. При этом учитывался тот факт, что оба цветения занимали приблизительно одинаковые акватории и в основном вписывались в прямоугольник от 37,75° с.ш., 49,5° в.д. до 38,75° с.ш., 52,25° в.д. Мы выбрали по одному изображению Южного Каспия с минимальными потерями данных в пределах указанного прямоугольника за каждый месяц названных лет, а затем нашли отношения числа пикселей с D1<0 и D2 <0 к числу всех доброкачественных пикселей на дату съемки в границах прямоугольника. Временной ход этих оценок служил ориентировочным показателем сезонной изменчивости индексов цветения на юге Каспийского моря.

Диагностический потенциал индекса D1 уточняли путем сравнения структуры распределений Rrs(555), chl_a, chlLOO и chlD1 (концентрация хлорофилла, найденная путем обращения эмпирической регрессии D1(chlLOO), построенных без осреднения исходных данных по времени и пространству. Предполагалось, что распределение «истинного» хлорофилла не должно в точности повторять распределение Rrs(555) там, где вероятно влияние непигментных факторов на оценки Rrs.

Результаты

На *рис. 1* представлены распределения оценок Rrs(555), D1 и D2, соответствующие начальной фазе цветения (карты A–C) и его кульминации (карты AA–CC). Очертания распределений индексов цветения D1 и D2 и видимых проявлений цветения Rrs(555) в точности совпадают на разных стадиях цветения, за двумя исключениями. Во-первых, индексы «не видят» слабый рост сигнала с приближением к берегу на юго-западе, заметный на картах A и AA. Во-вторых, при равном числе градаций распределения индексов на картах B и C беднее градациями по сравнению с картой A. Вместе с тем распределения индексов отличает более высокий уровень шума, особенно на картах C и CC (*puc. 1*).



Рис. 1. Распределения коэффициента яркости Rrs(555) (A и AA), индекса D1 (B и BB) и индекса D2 (C и CC). Они рассчитаны по данным MODIS Aqua от 18 августа (день года (ДГ) 230, A–C) и 1 сентября (ДГ 244, AA–CC) 2005 г. и представлены в декартовых координатах по долготе Xlo и широте Yla относительно точки 49,5° в.д., 37° с.ш. Каждая пара распределений коэффициента яркости и индексов построены в единой шкале градаций. Точки a-е принадлежат зональному профилю, проложенному через центр вихря с координатами Xlo = 72 км и Yla = 134 км и обозначают географическую привязку спектров на следующем рисунке. Неокрашенная область слева внизу представляет участок суши

По картам на *рис. 1* видно, что изменения характеристик цветения происходили на фоне эволюции мезомаштабного вихря, который вовлекал окружающие воды в область зрелого цветения. Как следствие, здесь имеет место зональное чередование оптически различных вод. Предположение было проверено на примере зонального профиля, проложенного через центр циклона в 134 км к северу от 37° с.ш. На этом профиле были выбраны точки *а–е* для сравнения формы спектров вод, в различной степени охваченных цветением. Такие спектры представлены на *рис. 2*.



Рис. 2. Спектры Rrs(λ) в точках а–е зонального профиля, проложенного через центр вихря с координатами Xlo = 72 км, Yla = 134 км (см. карты на рис. 2). Спектры построены по данным MODIS Aqua для ДГ 230 и ДГ244. Спектры, представленные пунктиром, принадлежат диапазону 0–3% ср⁻¹

Отметим сильную связь между уровнем Rrs при $\lambda < 555$ нм и формой спектра: все спектры с максимумом выше 0,5% ср⁻¹ характеризуются быстрым спадом коэффициента яркости с уменьшением длины волны и смещением длины волны максимума к 547–555 нм. Они относятся к точкам *d* (карта В на *puc. 1*) и *a*, *c*, *d* на карте BB там же. Замечательно, что в точке *b* карты BB спектр оказался почти плосковершинным с максимальной амплитудой около 0,5% ср⁻¹, тогда как задолго до кульминации цветения здесь наблюдался одновершинный спектр более высокой амплитуды при $\lambda < 547$ нм (спектр *b* на графике ДГ 230, *puc. 2*).

Рис. 3 дает представление об изменчивости амплитуд Rrs(555), D1 и D2 на том же зональном профиле. На начальной стадии цветения (график A) его область четко делится на западную и восточную части по уровню всех характеристик. Граница между ними приходится на 125 км, где Rrs(555) скачкообразно растет от фонового уровня 0,5% ср⁻¹ до 2% ср⁻¹, а D1 падает от слабоположительных до сугубо отрицательных оценок. Оценки D2 распределялись аналогичным образом с той разницей, что они были слабо отрицательными в западной части разреза. Спустя две недели (график B) все величины достигали уровней намного выше фонового на протяжении всего профиля, но надпороговые уровни чере-

довались с допороговыми значениями. Отметим, что в центре циклона Rrs(555) < 0,5% ср⁻¹ (левая стрелка на графике В), тогда как в 18 км к востоку от него (правая стрелка) Rrs(555) достиг абсолютного максимума за время цветения, если судить по доступным изображениям акватории южного Каспия.



Рис. 3. Изменчивость индексов D1, D2 и коэффициента яркости Rrs(555) на зональном профиле, проложенном через центр циклонического вихря (точка b на карте BB рис. 1). Графики A и B построены по данным MODIS Aqua для ДГ 230 и 244, 2005 г. Левая и правая стрелки на графике B обозначают местоположение центра вихря и ближайшего к нему максимума Rrs(555), соответственно. На графике С представлены профили коэффициента Q = 100×D2/D1%, рассчитанные по данным для дней года YD 230 и YD 244. L – расстояние от 49,5° в.д.

Графики А и В (*puc. 3*) свидетельствуют о сильной обратной корреляции значений Rrs(555), с одной стороны, и оценок D1 и D2 – с другой. По тем же графикам видно, что вариации этих индексов на профиле более или менее согласованы между собой.

Характер этой согласованности отражает график С на *рис. 3*. Он показывает широтный ход коэффициента Q = $100 \times D2/D1$. Несмотря на заметный разброс оценок Q, на графике C очевиден их постепенный рост с запада на восток согласно данным для ДГ230 на начальной стадии цветения и почти идеальное постоянство Q по данным для ДГ 244 во время его кульминации.

Данные профиля на *рис. 3* удобны для проверки характера связи между индексом D1 и хлорофиллом а благодаря широкому диапазону изменчивости оптических свойств вод на трассе вне прибрежий и мелководий. Проверка оказалась возможной благодаря доступности алгоритма (1), специально созданного для Каспийского моря. Он позволил найти концентрации хлорофилла a по оценкам Rrs(488) и Rrs(555) (MODIS) или Rrs(488) и Rrs(560) (MERIS) и сопоставить их с оценками индекса D1 для одних и тех же координат вдоль профиля. Линии регрессий и рассеяние данных относительно этих линий вместе с оценками коэффициентов детерминации R² на *рис.* 4 показывают следующее: 1) оценки индекса D1 и концентрации хлорофилла по данным MODIS и MERIS обратно пропорциональны во всем диапазоне его изменчивости на профиле; 2) линия регрессии индекса на хлорофилл по MODIS-данным круче, чем в случае MERIS-данных; 3) расхождения линий регрессии по крутизне таковы, что сканеры MODIS и MERIS дали бы практически неразличимые оценки хлорофилла по индексу D1 при chlLOO < 3 мг м⁻³, но при chlLOO > 3 мг м⁻³ превышение оценок хлорофилла по MERIS над оценками по MODIS растет вслед за содержанием хлорофилла в воде; 4) концентрация хлорофилла а, найденная посредством алгоритма (1), является практически единственным фактором формирования линейных регрессий на *рис.* 4. Оценки концентрации хлорофилла chl а на том же профиле с помощью стандартного алгоритма MODIS дали среднее значение 14 мг м⁻³ и диапазон от 2,1 до 37,6 мг м⁻³.

Аналогичная проверка регрессии индекса D2 на концентрацию дополнительного пигмента невозможна, поскольку таковой еще не идентифицирован. К тому же MERIS не оснащен каналом на 469 нм. Оценка регрессии D2(chlLOO) по данным MODIS выявила более значительное рассеяние данных относительно линии регрессии и менее значимый вклад chlLOO в вариации индекса D2 вдоль профиля: оценки R² упали до 0,56 для ГД 230 и до 0,76 для ДГ 244.

Оценки годового хода относительной населенности области цветения пикселями с отрицательными индексами D1 и D2 представлены на *рис. 5*. Здесь очевиден рост доли таких индексов в конце лета – начале осени 2005 г. и его повторение во время менее сильного цветения 2010 г. только в случае индекса D2. Сравнивая поведение индексов D1 и D2 в 2005 г., нетрудно заметить, что доля отрицательных индексов D2 начала расти раньше D1 < 0 в год интенсивного цветения, тогда как в год умеренно сильного цветения (2010 г.) летне-осенний рост доли пикселей с D2 < 0 состоялся на фоне едва заметного роста мно-

жества D1 < 0. Важная неожиданность состоит в том, что отрицательные индексы D2 встречались как в поздне-осенний и зимний периоды в годы цветений, так и в предшествующие годы.



Рис. 4. Линейные регрессии индекса D1 на концентрацию хлорофилла а chlLOO, рассчитанные согласно (1) для ДГ 244 и Х-координат профиля на рис. 4 по данным MODIS Aqua с усреднением по интервалам оси абсцисс 2 км (точки и сплошная линия) и MERIS с усреднением по интервалам 1 км (наклонные кресты и пунктир). R2 – коэффициенты детерминации. Индекс LOO указывает на принадлежность авторства алгоритма (1) Лаборатории оптики океана ИО РАН (подробности – в тексте)

Обсуждение результатов

Обещанное во Введении уточнение диагностического потенциала индикаторов цветения состоялось с плюсом и минусом. В плюс можно записать успех первой попытки установить характер связи индексов с концентрацией пигментов, пополнение копилки фактов в пользу смысловой неодинаковости индексов D1 и D2, несмотря на их спектральную близость, и получение наглядных доказательств прямого влияния динамики вод на мезомасштабную перемежаемость спектральных характеристик вод в зоне цветения цианобактерий. К минусам придется отнести возможное ограничение применимости индекса D2 в водах с прозрачностью, промежуточной между океанической и морской, и, предположительно, появление отрицательных D2 неустановленного происхождения в осенне-зимний период. Согласно *рис. 4* индекс D1 принимал отрицательные значения при концентрации хлорофилла *a* в воде около 0,5 мг м⁻³, что соответствует водам средней трофности, и убывал до уровня -0,3% ср⁻¹ при концентрации 4–5 мг м⁻³, характерной для эфтрофных вод, к коим принадлежат и воды регионов, охваченных цветением. В тех же условиях определения концентрации хлорофилла согласно стандартному MODIS-алгоритму дали существенно более высокие оценки (см. выше). Завышение концентраций хлорофилла в Южном Каспии этим алгоритмом было уверенно зафиксировано также в (Mahiny et al., 2013). Нам не удалось найти сведения об определении концентрации хлорофилла *a* контактным методом на месте и во время исследуемых событий. Результаты подобных определений в южном прибрежье Каспийского моря (например, (Bagheri et al., 2012)) дают основание полагать, что определения хлорофилла путем пересчета оценок индекса D1 в концентрацию хлорофилла *a* по регрессиям на *рис. 4* окажутся намного менее смещенными по сравнению с хлорофиллом, рассчитанным по стандартному MODIS-алгоритму.

Строгая линейность обеих регрессий на *рис. 4* усиливает привлекательность индекса D1 как возможного средства дистанционного определения концентрации хлорофилла *a*. Различия наклона регрессий и более сильное рассеяние данных относительно линии регрессии, рассчитанной по данным MERIS, может быть связано с двумя обстоятельствами. Во-первых, с различием длин волн коэффициентов яркости в знаменателе формулы (1) (555 нм у MODIS и 560 нм у MERIS). Во-вторых, с чередованием почти плосковершинных спектров Rrs(λ) (*a* и *c* на графике ДГ 230 и *b* на графике ДГ 244) с островершинными спектрами Rrs(λ) (*a*, *c*, *d*, *e* на графике ДГ 244) на зональном профиле (*puc. 2*). Вершины последних приурочены к интервалу 531–560 нм, где у MODIS имеется три спектральных канала, а у MERIS есть лишь единственный канал на 560 nm. Поэтому MERIS хуже отслеживает изменения формы спектра, а это – основа действия алгоритма (1).

Статистически значимое падение оценок корреляции D2 и CHL_{LOO} по сравнению с корреляцией D1- CHL_{LOO} до уровня умеренно сильной связи согласуется с представлением об обусловленности коротковолнового минимума на 488 нм присутствием дополнительных пигментов в клетках *Nodularia sp.* в виде каротеноидов. Их «дополнительность» означает отличия от хлорофилла *a* в том, что касается строения и функций в общем носителе – клетке цианобактерии, чем и объясняется пониженная, но не нулевая корреляция D2 и chlLOO. Одно из доказательств наличия каротеноидов в балтийских водах во время цветения той же *Nodularia sp.* предъявили Poutanen и Nikkilä (2001). Подобные свидетельства полезны, но недостаточны для уверенного суждения о физическом смысле индекса D2.

Мезомасштабная изменчивость спектров коэффициента яркости вод в зоне цветения цианобактерий

Циклоническая завихренность вод играла решающую роль в сильной мезомасштабной изменчивости спектров $Rrs(\lambda)$ во время цветения 2005 г. В этом легко убедиться по соответствиям формы спектральных распределений Rrs на *puc. 2* элементам пространственных распределений Rrs(555) на *puc. 3*. Бросается в глаза парадоксальное соотношение спектров на начальной и кульминационной стадиях цветения (А–С и АА–СС на *puc. 1*). Амплитуда спектра уменьшилась в точке *b*, и он превратился в почти плосковершинное распределение, тогда как спектры в соседних точках *a* и *c* изменились прямо противоположным образом при кратном увеличении коэффициентов яркости на всех длинах волн, особенно при $\lambda > 550$ нм.

Естественное объяснение этих трансформаций состоит в следующем. За две недели в точке *b* в слое формирования восходящей яркости уменьшилось содержание обратно-рассеивающей взвеси (отсюда падение Rrs по всему спектру) и CDOM (отсюда смещение длины волны к коротковолновой границе спектра и его «плосковершинность»). Тогда же в том же слое в точках *а* и *с* резко выросло содержание взвеси (отсюда кратный рост Rrs при $\lambda > 550$ нм и усиленный спад Rrs между максимумом на 555 нм и сине-фиолетовым участком спектра). Причина перемен в том, что циклоническому вихрю свойственен подъем глубинных вод к поверхности в центре вихря, т.е. в точке b. Пока вихрь слаб, вода здесь близка по своим свойствам к окружающим водам (ДГ 230), но с усилением завихренности она замещается глубинной водой, в которой мало светорассеивающих частиц и СDOM. Вихрь вовлекает окружающие воды, в разной степени охваченные цветением, и там, где оно достаточно развито, быстро растут концентрации частиц и CDOM за счет продуктов их жизнедеятельности, разложения и прижизненных выделений, включая СООМ. Влияние этих продуктов и выделений на оптику приповерхностной толщи хорошо известно по данным о цветениях балтийских цианобактерий (Kutser, 2004) и отмечалось при изучении цветения 2005 г. на юге Каспийского моря (Soloviev, 2005). В данном случае речь идет о позднелетнем цветении, когда зимний запас питательных солей, необходимый для успешного фотосинтеза, бывает исчерпан в верхнем слое моря. Естественно предположить, что циклоническая завихренность поверхностных вод и связанный с ней приток указанных солей из глубины к поверхности были не только фоном, но и причиной самого цветения.

Сезонный ход индексов D1 и D2 на юге Каспийского моря

В основном сезонный ход индексов D1 и D2 на *puc. 5* соответствует предположению об их тесной связи с обилием микроорганизмов – носителей хлорофилла и дополнительных пигментов, чьи полосы поглощения порождают коротковолновые минимумы в спектрах Rrs. Отрицательные D1 и D2 практически отсутствовали с февраля по июнь и с марта по май 2005 г соответственно, когда цветение состоялось в августе-сентябре. Здесь хорошо видно, что пиксели с D2 < 0 опережали пиксели с D1 < 0 по относительной численности с развитием цветения в 2005 г. Цветение 2010 г. было не столь интенсивным. В этом случае численность пикселей типа D1 < 0 намного уступала численности пикселей с D2 < 0.

Неожиданный результат на графиках (*puc. 5*) состоит в том, что отрицательные оценки индексов появлялись не только в период цветения, но и после него с поздней осени до



Рис. 5. Сезонный ход отношений N числа пикселей с D1 < 0 и D2 < 0 к числу всех доброкачественных пикселей в пределах зоны цветения от 37,75° с.ш., 49,5° в.д. до 38,75° с.ш., 52,25° в.д. Рассчитано по ее изображениям с минимальными потерями данных для дней 2004, 2005, 2009 и 2010 годов (пояснения – в тексте)

ранней весны. В литературе упоминается зимний максимум годового хода концентрации хлорофилла на юго-западе Каспийского моря (Bagheri et al., 2012), что и могло бы быть причиной указанной неожиданности в годовом ходе оценок индексов. Однако спектры на *рис. 2* подсказывают еще одну возможную причину. Там видно, что южно-каспийские воды, не охваченные цветением, отличаются почти плосковершинными спектрами с минимальной амплитудой и относительно незначительным спадом к коротковолновой границе спектра (*a* и *c* на графике ДГ 230 и *b* на графике ДГ244). Спектры такого типа имеют форму, промежуточную между формой спектров вод внутренних морей и открытого океана. Четко выраженный максимум характерен для морских спектров благодаря крутому спаду коротковолнового крыла из-за обилия CDOM в воде. Светопоглощение CDOM ничтожно в открытом океане, и Rrs растет там с уменьшением длины волны света вплоть до границы между УФ и видимым излучением (380–400 нм). Для объяснения отрицательных D1 и D2 в зимнее время требуются специальные исследования.

Диагностический потенциал индекса D1

Картины цветения на картах AA (Rrs(555)) и BB (D1) на *рис. 1* подобны, кроме прибрежной полосы моря вдоль дуги (границы суши) от отметки 50 км по широте до отметки 100 км по долготе. Здесь при переходе от зоны цветения к суше Rrs(555) проходит через минимум, тогда как D1 остается в пределах градации, в наименьшей степени затронутой цветением. Иначе говоря, индекс D1 «не видит» прибрежную зону, всегда заметную на изображениях моря из-за характерного обилия минеральной взвеси в воде.

Распределения на *рис. 6* показывают, как обстоит здесь дело с оценками хлорофилла посредством алгоритмов, основанных на отношениях и разности спектральных коэффициентов яркости. Они построены с использованием спектрально-различных оценок Rrs одних и тех же пикселей изображения зоны цветения от 1 сентября 2005 г. (ДГ 244) в шести градациях от минимума до максимума каждое. Карта chlD1 играет здесь особую роль. Оценки chlD1 рассчитывались по формуле:

$$chlD1 = 0,61 - 11,94 \times D1,$$
 (2)

коэффициенты которой были найдены путем обращения линейной регрессии MODIS на *рис.* 4. Согласно (2) при D1 \approx +0,05 имеет место chlD1 \approx 0, и дальнейший рост оценок D1 порождает физически нелепые chlD1 < 0. Но среднеположительные и существенно положительные D1 свидетельствуют об отсутствии заметного поглощения коротковолновой радиации хлорофиллом *a*, поскольку его концентрация ниже порога чувствительности индекса D1. Это состояние отражает дополнительная градация chlD1 < 0 (черный цвет) на соответствующей карте (*puc.* 6).



Рис. 6. Распределения Rrs(555) % ср⁻¹ и концентраций хлорофилла a chl_a мг м⁻³ по MODIS, chlLOO мг м⁻³ по формуле (1) и chlD1 мг м⁻³, найденной путем обращения perpeccuu MODIS на рис. 5. Рассчитано по соответствующим атрибутам каждого доброкачественного пикселя картины зоны цветения, полученной MCЦO MODIS 1 сентября 2005 г. (ДГ 244). Неокрашенная область на юго-западе представляет сушу. Пояснения – в тексте.

Нетрудно убедиться в том, что распределения характеристик на *рис.* 6 сходны по структуре в области цветения при всех различиях их амплитуд и природы. Иначе обстоит дело между южной границей цветения и прибрежьем. Здесь Rrs(555), chl_a и chlLOO проходят через минимум, тогда как chlD1 монотонно убывает с севера на юг. Другая особенность распределения chlD1 состоит в том, что южный выступ области цветения около отметки 51° в.д. занят градацией среднего уровня, тогда как на картах Rrs(555), chl_a и chlLOO он сравним по амплитуде сигнала со структурными элементами максимальной амплитуды внутри области цветения.

Подобие распределений Rrs(555), chl_a и chlLOO южнее области цветения на *рис. 6* естественно объяснить влиянием минеральной взвеси, содержание которой всегда растет с приближением к берегу, но может быть значительным и вдали от него на обширных мелководьях (Karabashev, Evdoshenko, 2012). На юге Каспия действует также речной сток нескольких рек как дополнительный поставщик такой взвеси. Их плюмы часто видны на спутниковых изображениях иранского побережья.

Индекс D1 «игнорировал» скопления минеральной взвеси независимо от сложности предварительной обработки данных (карты на *puc. 6*, в отличие от карт на *puc. 1*, построены по неосредненным данным уровня L2).

Заключение

Достигнутый уровень представлений об изменчивости индексов цветения D1 по D2 и их связях с характеристиками обилия фитопланктона и состояния морской среды позволяют уточнить границы применимости индексов. Начнем с принципиальных ограничений. Первое состоит в том, что индексы оцениваются как результат операции вычитания, а ее результат отягощен повышенной относительной случайной погрешностью. Второе столь же очевидно: порог применимости индексов по концентрации хлорофилла оказался приблизительно на порядок выше порога применимости спутниковых оценок концентрации хлорофилла в воде по алгоритмам, основанным на отношениях спектральных коэффициентов яркости. Поэтому скорее всего индексы будут востребованы только как средство изучения цветений, т.е. они не универсальны. Отсюда вытекает повышенная трудность точного определения информативности индексов, поскольку цветения не поддаются полной имитации в эксперименте и потому требуют постановки комплексных натурных наблюдений объекта, непредсказуемого по месту и времени его появления и эволюции.

Принципиальное достоинство индексов заключается в том, что они принимают отрицательные значения только там, где воды содержат фотосинтетические пигменты, чьи максимумы поглощения согласованы с каналами МСЦО по спектральным характеристикам. Поглощение и рассеяние света любыми иными естественными примесями морской воды гораздо менее селективно по сравнению с фитопигментами. Поэтому определение индексов посредством вычитания спектрально близких Rrs хотя бы частично компенсирует фоновое поглощение ОРОВ, влияние неточностей атмосферной коррекции и других слабо селективных факторов. Это качество особенно выигрышно в водах шельфа и внутренних морей, богатых разнообразными примесями. Согласованность индексов с каналами МСЦО длительного пользования позволяет использовать накопленные архивы спутниковых данных для выявления закономерностей морских цветений без искажений, обусловленных чужеродными примесями. Представляется целесообразным создание спутникового спектрально-разностного алгоритма определения хлорофилла, учитывающего форму спектра вычитаемого фонового излучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 14-17-00451).

Литература

- 1. *Карабашев Г.С., Евдошенко М.А.* Спектральные признаки цветения цианобактерий в Балтийском море по данным сканера MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 3. С. 158–170.
- Шеберстов С.В. Система пакетной обработки океанологических спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 6. С. 154–161.
 Bagheri S.I., Mansor M., Turkoglu M., Makaremi M., Omar W.M.W., Negarestan H. Phytoplankton Species
- 3. Bagheri S.I., Mansor M., Turkoglu M., Makaremi M., Omar W.M.W., Negarestan H. Phytoplankton Species Composition and Abundance in the Southwestern Caspian Sea // Ekoloji 21. 2012. Vol. 83. P. 32–43. DOI: 10.5053/ekoloji.2012.834.
- 4. Blondeau-Patissier D., Gower J. F.R., Dekker A.G., Phinn S.R., Brando V.E. A review of ocean color remote sensing methods and statistical techniques for the detection, mapping, and analysis of phytoplankton blooms in coastal and open oceans // Progress in Oceanography. 2014. Vol. 123. P. 123–144.
- 5. *Karabashev G.S., Evdoshenko M.A.* Influence of the wind field on the radiance of a marine shallow: evidence from the Caspian Sea // Oceanologia. 2012. Vol. 54. No. 4. P. 1–19. DOI: 10.5697/oc.54-4.x.
- Karabashev G.S., Evdoshenko M.A. On spectral indications of cyanobacterial blooms at ecologically different marine aquatic areas from satellite data // Proceedings of 8th International Conference "Current Problems in the Optics of Natural Waters". St. Petersburg. 2015. P. 171–176.
- *Karabashev G.S., Evdoshenko M.A.* Narrowband shortwave minima in spectra of backscattered light from the sea obtained from ocean color scanners as a remote indication of algal blooms // Oceanologia. 2016. Vol. 58. No. 5. P. 279–291. URL: http://dx.doi.Org/10.1016/j.oceano.2016.05.001.
 Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Sahling I.V., Vazyulya S.V., Burenkov V.I. Bio-optical characteristics of the
- 8. *Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Sahling I.V., Vazyulya S.V., Burenkov V.I.* Bio-optical characteristics of the Barents, White, Black, and Caspian Seas from data of satellite ocean color scanners. 2013. URL: http://optics. ocean.ru.
- 9. *Kutser T*. Quantitative detection of chlorophyll in cyanobacterial blooms by satellite remote sensing // Limnology and Oceanography. 2004. Vol. 49. P. 2179–2189.
- Mahiny S.A., Fendereski F., Hosseini S.A., Fazli H. A MODIS-based estimation of chlorophyll a concentration using ANN model and in-situ measurements in the southern Caspian Sea // Indian Journal of Geo-Marine Sciences. 2013. Vol. 42. No. 7. P. 924–928.
- 11. *Moradi M*. Comparison of the efficacy of MODIS and MERIS data for detecting cyanobacterial blooms in the southern Caspian Sea // Marine Pollution Bulletin. 2014. Vol. 87. P. 311–322. URL: http://dx.doi.org/10.1016/j. marpolbul.2014.06.053.
- 12. Nasrollahzadeh H.S., Makhlough A., Pourgholam R., Vahedi F., Qanqermeh A., Foong S.Y. The study of Nodularia Spumigena bloom event in the southern Caspian Sea // Applied ecology and environmental research. 2011. Vol. 9. No. 2. P. 141–155.
- 13. *Poutanen E.-L., Nikkilä K.* Carotenoid pigments as tracers of Cyanobacterial blooms in recent and post-glacial sediments of the Baltic Sea // AMBIO: A Journal of the Human Environment. 2001. Vol. 30. No 4. P. 179–183. URL: http://dx.doi.org/10.1579/0044-7447-30.4.179.
- 14. Soloviev D. Identification of the extent and causes of cyanobacterial bloom in September-October 2005 and development of the capacity for observation and prediction of HAB in the Southern Caspian Sea using Remote Sensing Technique. 2005. URL: http://caspian.iwlearn.org/caspian-1/anomalous-algal-bloom/documents_and_pics/HABrepFinalFull_corrected_compressed_pictures.doc/view.
- 15. Wozniak B., Dera J. Light Absorption in Sea Water. New York: Springer Science + Business Media. 2007. 463 p.

Shortwave minimums of reflectance of water surface as a remote indication of blooms of *Nodularia spumigena* in the southern **Caspian Sea**

G.S. Karabashev, M.A. Evdoshenko

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

The capabilities of remote indication of algal blooms by means of the deficit of water-leaving radiance have been refined on the example of cyanobacterial blooms of 2005 and 2010 in the Caspian Sea. The deficit is due to the shortwave maximums of light absorption by chlorophyll a and accessory pigments. The chlorophyll index D1 = Rrs(443)–Rrs(412) and accessory pigments index D2 = Rrs(488)–Rrs(469) were used to quantify the deficit in terms of Rrs as water surface reflectance estimated from the MODIS data at wavelengths 412, 443, 469, and 488 nm. These blooms are the most conforming to the goals of our study because they developed against background of a mesoscale vortex in the aquatic area unaffected by sources of foreign optically significant admixtures. We retrieved the concentration of chlorophyll a as chlLOO from the MODIS imagery with the help of a regional algorithm (Kopelevich et al., 2013) and established that index D1, found from the same images, is inversely proportional to chlorophyll when the latter varies from 0.5 to 5–6 mg m⁻³. The time series of occurrence of D1<0 and D2<0 within the same bloom area for the periods from January 2004 and 2009 to December 2005 and 2010 revealed the absence of negative indices from spring to early summer. They were abundant in the area from August to October. The growth of population of D2<0 therewith increased in number of pixels having D1<0. We observed similar succession during the Baltic Sea bloom of cyanobacteria in 2005. We compared the distributions of reflectance Rrs(555) and concentrations of chlorophyll a chl_a from standard MODIS algorithm, chlLOO, and chlD1, found from the linear dependence D1(chlLOO) respectively. In contrast to the former three quantities, the distribution of CHL_{D1} proved to be insensitive to the coastal maximum of turbidity. In total, our findings prompt to develop a spectral-difference algorithm for retrieval of chlorophyll from the data of ocean color scanners during algal blooms because the difference signal is less dependent on factors, irrelevant to algal pigments, as compared to the band-ratio algorithms.

Keywords: cyanobacterial bloom, Caspian Sea, chlorophyll, accessory pigments, remote sensing algorithms, MODIS sensor

> Accepted: 12.12.2016 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-1-159-174

References

- Karabashev G.S., Evdoshenko M.A., Spektral'nye priznaki tsveteniya tsianobakterii v Baltiiskom more po dan-1. nym skanera MODIS (Spectral indications of cyanobacterial bloom in the Baltic Sea from data of MODIS sensor), Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2015, Vol. 12, No. 3, pp. 158–170.
- Sheberstov S.V., Sistema paketnoi obrabotki okeanologicheskikh sputnikovykh dannykh (A system for batch pro-2 cessing of oceanological satellite data), Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2015, Vol. 12, No. 6, pp. 154–161. Bagheri S.I., Mansor M., Turkoglu M., Makaremi M., Omar W.M.W., Negarestan H., Phytoplankton Species
- 3. Composition and Abundance in the Southwestern Caspian Sea, Ekoloji 21, 2012, Vol. 83, pp. 32-43. DOI: 10.5053/ekoloji.2012.834.
- Blondeau-Patissier D., Gower J. F.R., Dekker A.G., Phinn S.R., Brando V.E., A review of ocean color remote 4. sensing methods and statistical techniques for the detection, mapping and analysis of phytoplankton blooms in coastal and open oceans, *Progress in Oceanography*, 2014, Vol. 123, pp. 123–144.
- Karabashev G.S., Evdoshenko M.A., Influence of the wind field on the radiance of a marine shallow: evidence 5. from the Caspian Sea, Oceanologia, 2012, Vol. 54, No. 4, pp. 1-19. DOI: 10.5697/oc.54-4.x.
- Karabashev G.S., Evdoshenko M.A., On spectral indications of cyanobacterial blooms at ecologically different marine aquatic areas from satellite data, *Proceedings of 8th International Conference "Current Problems in the Optics of Natural Waters*", St. Petersburg, 2015, pp. 171–176. Karabashev G.S., Evdoshenko M.A., Narrowband shortwave minima in spectra of backscattered light from the 6
- 7. sea obtained from ocean color scanners as a remote indication of algal blooms, Oceanologia, 2016, Vol. 58, No. 5,
- pp. 279–291. URL: http://dx.doi.Org/10.1016/j.oceano.2016.05.001. Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Sahling I.V., Vazyulya S.V., Burenkov V.I., *Bio-optical characteristics of the Barents, White, Black, and Caspian Seas from data of satellite ocean color scanners*, 2013. URL: http://optics. 8. ocean.ru.
- 9. Kutser T., Quantitative detection of chlorophyll in cyanobacterial blooms by satellite remote sensing, Limnology
- *and Oceanography*, 2004, Vol. 49, pp. 2179–2189. 10. Mahiny S.A., Fendereski F., Hosseini S.A., Fazli H., A MODIS-based estimation of chlorophyll *a* concentration using ANN model and in-situ measurements in the southern Caspian Sea, Indian Journal of Geo-Marine Sciences, 2013, Vol. 42, No. 7, pp. 924–928.

- 11. Moradi M., Comparison of the efficacy of MODIS and MERIS data for detecting cyanobacterial blooms in the southern Caspian Sea, *Marine Pollution Bulletin*, 2014, Vol. 87, pp. 311–322. URL: http://dx.doi.org/10.1016/j. marpolbul.2014.06.053.
- Nasrollahzadeh H.S., Makhlough A., Pourgholam R., Vahedi F., Qanqermeh A., Foong S.Y., The study of *Nodularia Spumigena* bloom event in the southern Caspian Sea, *Applied ecology and environmental research*, 2011, Vol. 9, No. 2, pp. 141–155.
- Vol. 9, No. 2, pp. 141–155.
 13. Poutanen E.-L., Nikkilä K., Carotenoid pigments as tracers of Cyanobacterial blooms in recent and post-glacial sediments of the Baltic Sea, *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2001, Vol. 30, No. 4, pp. 179–183. DOI: http://dx.doi.org/10.1579/0044-7447-30.4.179.
- 14. Soloviev D., Identification of the extent and causes of cyanobacterial bloom in September-October 2005 and development of the capacity for observation and prediction of HAB in the Southern Caspian Sea using Remote Sensing Technique, 2005. URL: http://caspian.iwlearn.org/caspian-1/anomalous-algal-bloom/documents_and_ pics/HABrepFinalFull_corrected_compressed_pictures.doc/view.
- 15. Wozniak B., Dera J., Light Absorption in Sea Water, New York: Springer Science + Business Media, 2007, 463 p.