

УДК 551.465

ВЛИЯНИЕ МЕЗОМАСШТАБНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ НА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИТОПИГМЕНТОВ В ФОТИЧЕСКОМ ВОДНОМ СЛОЕ ПО СПУТНИКОВЫМ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫМ ДАННЫМ О ЦВЕТЕ ОКЕАНА (ПРИМЕР ТАСМАНОВА МОРЯ)

© 2023 г. Г. С. Карабашев*

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

Поступила в редакцию 15.02.2022 г.

После доработки 18.08.2022 г.

Принята к публикации 15.09.2022 г.

Непостоянство состава фитопигментов при интенсивном мезомасштабном перемешивании фотического слоя Тасманова моря исследовано по MODIS-снимкам его поверхности. Для этого каждому пикселю снимка присваивается индекс WRM (Wavelength of Reflectance Minimum (длина волны минимума коэффициента яркости)), равный сумме длин волн минимумов в спектре коэффициента яркости водной поверхности в границах пикселя на местности. WRM приемлем как индикатор непостоянства состава фитопигментов в водной толще, поскольку спектры поглощения света фитопигментами в водной среде меняются вслед за видовой принадлежностью фитопланктона при том, что ослабление света водой как растворителем и ее примесями иной природы уступают поглощению света фитопигментами по спектральной селективности. Сравнительный анализ распределенных индексов WRM и характеристик вод Тасманова моря показал, что при повышенной мезомасштабной изменчивости вод открытого океана содержание фитопигментов в приповерхностном слое достигают уровня, при котором в спектрах обратно-рассеянной солнечной радиации появляются минимумы пигментного происхождения на длинах волн 400–550 нм, различимые мультиспектральными сканерами цвета океана. Этот эффект игнорируется общепринятыми алгоритмами определения хлорофилла по данным мультиспектральных сканеров цвета океана (band-ratio algorithms) и, видимо, является одной из причин известной склонности таких алгоритмов завышать оценки концентрации хлорофилла относительно его реального содержания даже на акваториях, свободных от влияния внешних источников оптически значимых примесей в водной толще.

Ключевые слова: MODIS, спектральное индексирование пикселей снимков Тасманова моря, мезомасштабная изменчивость фитопигментов в фотическом водном слое

DOI: 10.31857/S0030157423010045, **EDN:** ANUVAZ

1. ВВЕДЕНИЕ

Спектральные характеристики солнечной радиации, обратно-рассеянной водной толщей, давно используются при дистанционном определении биопродуктивности природных водоемов по данным мультиспектральных сканеров цвета океана (СЦО) типа SeaWiFS, MODIS и др. [2, 12]. Совершая несколько оборотов вокруг Земли в светлое время суток, СЦО формирует растровые изображения океана глобального охвата, что недоступно иными средствами изучения океана. Трудность в том, что указанные СЦО относятся к мультиспектральным устройствам с ограниченным количеством спектральных каналов в видимой области спектра (400–700 нм). Они достаточны для обнаружения эффектов, обусловленных водой и ее примесями с относительно “гладкими”

спектрами поглощения света (эоловая взвесь, РОВ, взмученные донные осадки и др.), но слишком малочисленны для восстановления формы спектров коэффициента яркости водного бассейна с учетом спектральных свойств пигментов фитопланктона. Попытки обойти эту трудность, опираясь на гипотезу Case1/Case2 waters [12, 13] как основу дистанционного определения хлорофилла в океане, уязвимы для критики [11], поскольку эта гипотеза основана на допущении о решающем влиянии продуктов жизнедеятельности морских растений и животных на светопоглощение природными водами и игнорирует возможность непосредственной зависимости формы спектра обратно-рассеянной солнечной радиации от количества пигментов в верхней толще водного бассейна.

Было показано [8], что в мультиспектрах обратнo-рассеянной солнечной радиации, регистрируемых СЦО MODIS, нередко минимумы коэффициента яркости моря Rrs на длинах волн максимального поглощения света хлорофиллом и дополнительными пигментами. СЦО MODIS выгодно отличается от других СЦО последовательностью спектральных каналов на длинах волн $\lambda_1 = 412$, $\lambda_2 = 443$, $\lambda_3 = 469$, $\lambda_4 = 488$, $\lambda_5 = 537$, $\lambda_6 = 547$, $\lambda_7 = 555$, $\lambda_8 = 645$, $\lambda_9 = 667$, $\lambda_{10} = 678$ нм. Среди них каналы на λ_2 и λ_{10} реагируют на присутствие хлорофилла в воде в форме минимума (светопоглощение) и максимума (флуоресценция) в спектре Rrs соответственно. Вместе с тем каналы от λ_1 до λ_7 покрывают интервал длин волн, которому принадлежат полосы поглощения света большинства фитопигментов [17]. Эти полосы частично перекрываются, и потому в MODIS-спектре Rrs пикселя растрового изображения моря вероятны минимумы пигментного происхождения.

Спектральные минимумы Rrs эффективны как инструмент диагностики потому, что в морской среде отсутствуют вещества со спектрами поглощения света более узкими, чем спектры поглощения света фитопигментами. Сам факт обнаружения минимума Rrs на длине волны λ_n относительно λ_{n-1} и λ_{n+1} в спектре пикселя MODIS-снимка акватории однозначно указывает на присутствие отдельного пигмента или комбинации пигментов в воде. Спектры поглощения и рассеяния света другими примесями природных вод (минеральная взвесь, РОВ и т.п.) описываются гладкими функциями длины световой волны и лишены экстремумов в видимой области спектра, сравнимых со спектрами пигментов по селективности [10]. Поэтому амплитуда линии поглощения света хлорофиллом ALH на длине волны 443 нм, определяемая как разность спектрально-близких Rrs , почти не зависит от концентраций иных окрашенных примесей в морской воде и может служить ориентировочным показателем обилия этого пигмента в воде.

Величину ALH нетрудно определять попиксельно путем линейной интерполяции оценок Rrs на длинах волн подошвы (412 и 469 нм) и минимума (443 нм) контура кривой поглощения света хлорофиллом по данным СЦО MODIS:

$$ALH = Rrs(412) + 0.54[Rrs(469) - Rrs(412)] - Rrs(443). \quad (1)$$

Подобный подход применим также к минимумам в области $\lambda > 443$ нм. Их появление неизбежно при надпороговой концентрации дополнительных пигментов, чьи спектры поглощения смещены к длинноволновому пределу видимого сол-

нечного излучения относительно пика поглощения света хлорофиллом [17].

Спектральное индексирование пикселей (СИП) MODIS-снимков водной поверхности (СИП-подход [8]) позволяет реализовать ориентировочный качественный анализ фитопигментов в толще, доступной дистанционному зондированию в видимой области спектра. Для этого атрибутам пикселя MODIS-снимка присваивается индекс WRM (Wavelength of Reflectance Minimum (длина волны минимума коэффициента яркости)), равный сумме длин волн минимумов в спектре коэффициента яркости водной поверхности в границах пикселя на местности. При дальнейшей обработке данных выполняется попиксельная проверка совпадения суммы длин волн минимумов в спектре отдельного пикселя MODIS-изображения моря с одним из WRM-кодов в таблице возможных сочетаний минимумов при регистрации спектра Rrs на длинах волн от λ_1 до λ_{10} спектральных каналов СЦО MODIS [8].

Процедура СИП основана на том, что MODIS-изображения акватории моря представимы в виде таблицы атрибутов пикселей снимка (ТАП). В ней первые два столбца заняты географическими координатами пикселей, а остальные хранят оценки Rrs каналами на длинах волн от $\lambda_1 = 412$ до $\lambda_{10} = 678$ нм и определения производных характеристик, включая стандартные расчетные величины chl_a (концентрация хлорофилла a) и K_d (показатель вертикального ослабления солнечного излучения на длине волны 488 нм). Максимумы спектров поглощения солнечного излучения большинством пигментов фитопланктона, как и связанные с ними минимумы Rrs , принадлежат спектральному интервалу 412–555 нм [17]. Коды WRM, соответствующие возможным сочетаниям длин волн пигментных минимумов в спектрах Rrs , зарегистрированных СЦО MODIS вышеуказанными каналами, представлены в табл. 1.

Спектральное индексирование пикселей было проверено на примере “цветений” фитопланктона в Балтийском море и Мексиканском заливе [8] и в регионах с интенсивной мезомасштабной динамикой вод (юг Каспийского моря и район схождения Мальвинского и Бразильского течений [9]). СИП-подход к анализу MODIS-данных из этих регионов позволил обнаружить ряд особенностей распределения и изменчивости носителей пигментов в морской среде. Вместе с тем доказательность этого опыта нуждается в подтверждении в регионах с развитой мезомасштабной динамикой вод, свободной от влияния рельефа дна, речного стока и прочих факторов, несвойственных открытому океану. К таким регионам относится область контакта вод Восточно-Австралийского и Циркумполярного течений в

Тасмановом море [5, 6, 16]. Существенно также, что этот регион неплохо изучен. На этих основаниях регион Тасманова моря был выбран в качестве тест-площадки для проверки эффективности СИП-подхода в регионе, где интенсивное перемешивание деятельного слоя океана происходит вдали от источников посторонних оптически значимых примесей.

2. ОБНОВЛЕНИЕ СИП-ПОДХОДА

Коды в таблице 1 не предусматривают индикацию минимумов Rrs на $\lambda_8 = 645$ нм, вероятных при обилии фикоцианина в воде во время “цветеный” носителей этого пигмента (например, цианобактерии *Trichodesmium*). Такие цветения случаются на многих морских акваториях и относятся к опасным природным явлениям из-за токсинов, испускаемых цианобактериями [1]. Поглощение света фикоцианином бывает столь значительным, что его присутствие в воде улавливается каналом СЦО MODIS на 645 нм ([4, 7]) при том, что максимум поглощения света этим пигментом приурочен к 621 нм [17].

Чтобы использовать MODIS-изображения акватории для регистрации проявлений фикоцианина в воде, воспользуемся оценкой высоты пика поглощения света фикоцианином (Phycocyanin Line Height, или PLH)

$$PLH = Rrs(667) - Rrs(645). \quad (2)$$

Такие Rrs принадлежат диапазону солнечного излучения, где его яркость быстро убывает с длиной волны из-за сильного поглощения света водой как растворителем, и потому в воде, свободной от фикоцианина, всегда $PLH < 0$, тогда как $PLH > 0$ уверенно указывает на присутствие значительных концентраций фикоцианина и его носителей в слое формирования сигнала СЦО MODIS.

Чтобы отразить в ТАП наличие PLH-значимых пикселей MODIS-снимка, было признано целесообразным оценки WRM таких пикселей увеличивать на константу, заведомо большую максимальных WRM в таблице 1. Исходя из опыта применения WRM-кодов [8, 9], такой константой было выбрано число 2000. Как следствие, теперь $WRM < 2000$ метят пиксели MODIS-снимка, чьи спектры лишены признаков присутствия фикоцианина в воде, тогда как $WRM > 2000$ указывают на его сосуществование с иными пигментами.

Обновленная версия СИП-подхода предусматривает также использование красной флуоресценции хлорофилла для индикации его обилия в приповерхностном слое водного бассейна. Эта флуоресценция заметна в MODIS-спектре Rrs в виде максимума на 678 нм и может быть оце-

Таблица 1. Коды WRM комбинаций длин волн минимумов Rrs

N	λ_{\min} , нм	Код WRM
1	Нет минимумов	100
2	443	443
3	469	469
4	488	488
5	531	531
6	547	547
7	443 + 488	931
8	443 + 531	974
9	443 + 547	990
10	443 + 488 + 547	1478
11	469 + 531	1000
12	469 + 547	1016
13	488 + 547	1035

нена по высоте линии флуоресценции хлорофилла FLH (Fluorescence Line Height):

$$FLH = Rrs(678) - Rrs(667). \quad (3)$$

Согласно [7], разность (3) применима как показатель наличия хлорофилла в воде там, где фоновые концентрации CDOM (Colored Dissolved Organic Matter (окрашенное растворенное органическое вещество)) и водной взвеси невелики и не влияют на интенсивность красной обратно-рассеянной солнечной радиации в воде. Природные условия Тасманова моря исключают влияние мелководий и речного стока на содержание оптически значимых примесей в его приповерхностной толще, что и гарантирует применимость разности (3) как индикатора хлорофилла. При этом сигнал FLH формируется исключительно в приповерхностном слое толщиной не более полуметра благодаря сильному поглощению такого излучения водой как растворителем, тогда как оценки ALH в открытом океане характеризуют многометровые толщи прозрачных природных вод. Эти обстоятельства указывают на возможность различения скоплений хлорофилла в подповерхностной толще и близ границы вода – воздух по данным СЦО MODIS.

3. ИЗОБРАЖЕНИЯ ТЕСТ-ПЛОЩАДКИ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Изображения тест-площадки выбирались на портале NASA <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/> по сезону (весна – лето Южного полушария) и полноте данных (умеренность пробелов данных, достаточная для распознавания формы мезомасштабных неоднородностей распределения харак-

теристик водной среды). Окончательный выбор данных и представление их в требуемом формате осуществлялось с помощью программного пакета SMCS [15]. Таким образом были задействованы данные уровня L2 для спектральных яркостей Rrs региона Тасманова моря, полученные посредством СЦО MODIS-Aqua весной (*A2019305040000.L2_LAC_OC.nc* (1 Nov 2019)) и летом (*A2019351041500.L2_LAC_OC.nc* (17 Dec 2019)) Южного полушария вместе с соответствующими распределениями MODIS-температуры поверхности воды ТПМ (*AQUA_MODIS.20191101T040000.L2.SST.NRT.nc* (1 Nov 2019)) и (*AQUA_MODIS.20191217T041501.L2.SST.nc* (17 Dec 2019)).

Стандартные оценки характеристик пикселей изображения тест-площадки сводились в табличные массивы атрибутов пикселей соответствующего MODIS-изображения Тасманова моря. Строка такого массива представляет долготу и широту пикселя, принадлежащие ему оценки Rrs на длинах волн от 412 до 678 нм, рассчитанные по MODIS-данным: коэффициент яркости $Rrs555$ на длине волны 555 нм как прокси мутности приповерхностного слоя, стандартное определение концентрации хлорофилла $a\ chl_a$, показатель ослабления солнечной радиации Kd_490 на длине волны 490 нм, оценка кода WRM, длина волны λ_{max} максимума спектра коэффициента яркости, высота линий флуоресценции хлорофилла FLH и оценка PLH как показатель обилия фикоцианина в воде. Формирование указанного массива и сопутствующие расчеты выполнялись посредством оригинального MATLAB-скрипта.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

4.1 Типы спектров Rrs и их распределение в Тасмановом море

СИП-подход к анализу спектров Rrs делает возможной классификацию спектров Rrs попиксельно согласно λ_{max} и кодам WRM. Такая классификация полезна для различения эффектов, зависящих от фитопигментов в визируемой водной толще, а также от обилия CDOM и водной взвеси, которые появляются на конечных стадиях деградации отмерших микроводорослей. В случае фитопигментов речь идет об изменчивости на масштабах и периодах, характерных для клеток живого фитопланктона и малых по сравнению с аналогичными характеристиками CDOM и водной взвеси, состоящей из отмершего фитопланктона.

Этот подход был проверен на примере ноябрьского снимка тест-площадки как максимально информативного по сравнению с ее декабрьским изображением. При подготовке данных к анализу было найдено, что воды с признаками присут-

ствия фикоцианина сравнимы по распространенности с водами без его проявлений. Выяснилось также, что пиксели класса $WRM > 469$ намного уступают прочим пикселям по численности, и потому встречаемость пикселей указанных классов здесь не обсуждается.

Как следствие, использовались данные пикселей WRM-классов с пигментными минимумами на 443 и 469 нм. Они группировались по длине волны максимума в спектре Rrs (λ_{max} от 412 до 531 нм) и по отсутствию (панели 1 и 3) и наличию (панели 2 и 4) признаков фикоцианина в воде. Соответствующие графики на рис. 1 представляют средние спектры перечисленных выборок данных, сформированных из первых квартилей распределений амплитуд минимумов на 443 и 469 нм. Объемы соответствующих выборок приведены в легендах графиков.

Заслуживают внимания следующие факты:

1) Несмотря на низкий уровень сигнала при $\lambda > 600$ нм, все графики проходят через минимум на 645 нм только на панелях (2) и (4) в соответствии с представлением о возможности обнаружения фикоцианина в MODIS-спектре обратно-рассеянной солнечной радиации благодаря мощному максимуму поглощения света этим пигментом в полосе на 621 нм.

2) Наличие фикоцианина в воде сопровождало ослабление обратно-рассеянной солнечной радиации в диапазоне 400–500 нм там, где преобладает ослабление света хлорофиллом (панели (1) и (2)), однако подобный эффект отсутствовал там, где спектральный минимум Rrs обусловлен дополнительными пигментами (панели (3) и (4)).

4.2. Струйно-вихревые структуры распределений спектральных Rrs

Рассматриваемые структуры представлены на рис. 2 отдельно в соответствии с отсутствием ($WRM < 2000$) или наличием ($WRM > 2000$) признаков влияния фикоцианина на форму спектра Rrs . Несмотря на ложную пространственную периодичность представленных характеристик, обусловленную особенностями функционирования аппаратной части СЦО MODIS при слабом сигнале [3], на картах рис. 2 очевидно преобладание пигментов без заметной примеси фикоцианина преимущественно на севере и востоке тест-площадки (панель (1)), тогда как носители фикоцианина проявились главным образом на юге и западе последней (панель (2)). В обоих случаях значительную часть изображения тест-площадки занимали пиксели, чьи спектры были лишены минимумов, указывающих на преимущественное поглощение света хлорофиллом и (или) дополнительными пигментами в отсутствие ($WRM = 100$)

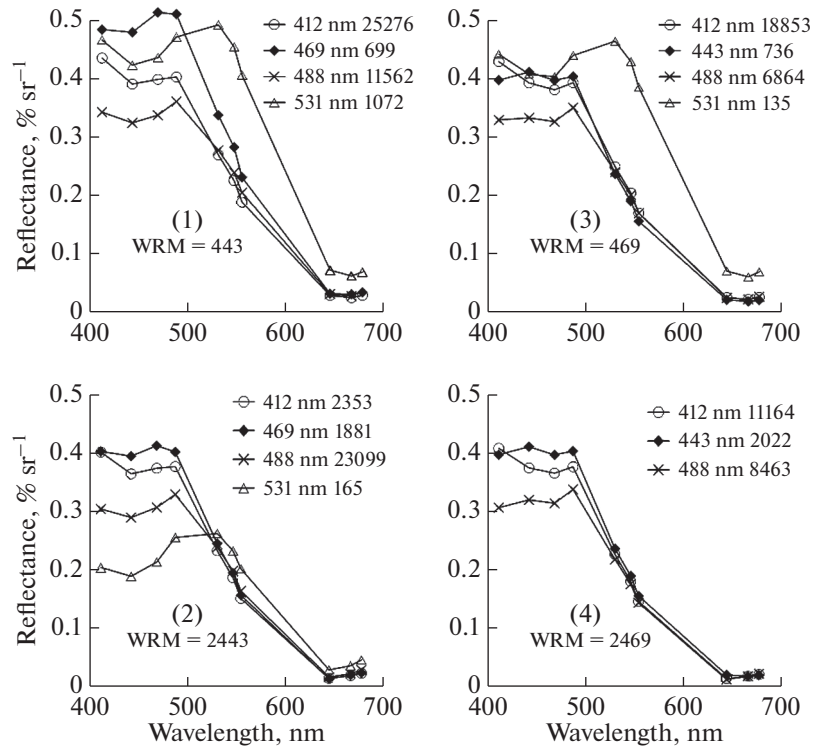


Рис. 1. Панели 1 и 3: средние спектры выборок пикселей класса WRM = 443 (1) и WRM = 469 (3) с λ_{\max} от 412 до 531 нм в водах без признаков фикоцианина в воде. Панели 2 и 4: то же, но при наличии указанных признаков. Объемы выборок приведены в легендах графиков.

и при наличии (WRM = 2100) фикоцианина в зондируемой водной толще. При этом в распределениях индексов WRM > 100 и WRM > 2100 заметны струйно-вихревые структуры между 151° и 155° в.д. и 38° и 40° ю.ш.

Распределения $T(^\circ\text{C})$ и спектральная яркость $Rrs(555)$ представлены на рис. 3. Здесь карты (1) и (3) построены по MODIS-данным от 1 ноября 2019 г., тогда как распределения (2) и (4) основаны на данных, полученных спустя полтора месяца.

Картина на панели (1) рис. 3 замечательна парой сопряженных эллипсов (ПСЭ) между параллелями 38.5° ю.ш. и 40° ю.ш. Здесь эта пара представлена водами с температурой около 17°C , промежуточной между верхним и нижним пределами температур в границах снимка. Очертания ПСЭ различимы и в поле $Rrs555$ (панель (3)), но яркость контура западного эллипса была здесь вдвое ниже максимальной $Rrs555$ в восточном эллипсе.

Распределения на панелях (2) и (4) рис. 3 сформировались спустя полтора месяца после съемки распределений на панелях (1) и (3) того же рисунка. За это время более теплые воды сместились в юго-западном направлении (панель (2) на рис. 3, область от 40° ю.ш., 150° в.д. до 39° ю.ш., 153° в.д., занятая водами с ТПМ = 18°C). Градации $Rrs555$

на панели (4) рис. 3 свидетельствуют о наличии здесь неоднородностей большой протяженности при малом поперечнике (например, струеподобная структура с яркостью от 0.15 до 0.20%/ср к северу и югу от точки 153° в.д., 39° ю.ш.).

Особенно показательны распределения концентрации хлорофилла chl_a , найденной посредством стандартного MODIS-алгоритма, и интенсивность флуоресценции хлорофилла, определяемая как высота линии флуоресценции FLH, представленные на рис. 4. Здесь распределение FLH повторяет по своим очертаниям распределение ТПМ на рис. 3, тогда как распределение chl_a подобно распределению $Rrs555$ на панели (3) рис. 3.

Заслуживает внимания подобие неоднородностей chl_a (панель (2), $chl_a = 0.7$ мг/м³) и FLH (панель (4), FLH = 0.006%/ср между 40° ю.ш. и 38° ю.ш. (рис. 4)). Форма и малость поперечника по сравнению с длиной дают основание говорить о струйной природе этих неоднородностей. Вместе с тем распределения chl_a (1) и FLH (3) в целом противоречат друг другу, поскольку максимальные chl_a имели место восточнее меридиана 153° в.д., тогда как наибольшие FLH были зарегистрированы к западу от него.

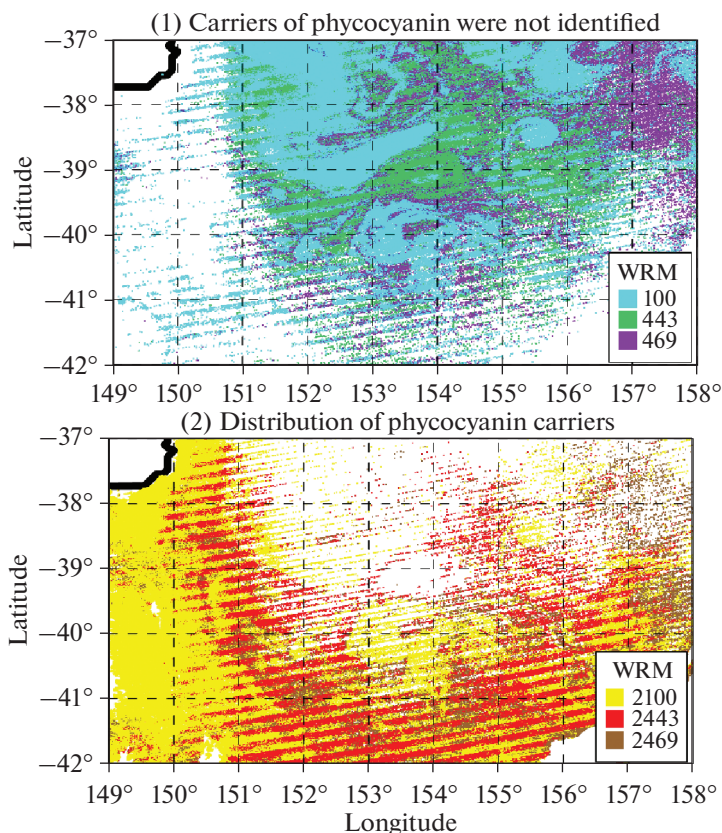


Рис. 2. (1) Распределения пикселей изображения тест-площадки с оценками WRM < 2000, свидетельствующими об отсутствии фикоцианина в воде в концентрациях выше порога его обнаружения (PLH ≤ 0). (2) Распределение индексов WRM > 2000 как свидетельство надпороговых концентраций фикоцианина там же при PLH > 0.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

5.1 Пространственная изменчивость ТПМ и оптических характеристик

Суммарная населенность выборок данных, использованных при построении графиков на рис. 1, сравнима с количеством доброкачественных пикселей исходного MODIS-изображения Тасманова моря от 1 ноября 2019 г., и потому эти графики достаточно полно отражают разнообразие спектров Rrs , свойственное указанной акватории в момент съемки, а типы профилей, представленные на графиках, статистически значимы. Обращение к первым квартилям распределений по амплитуде минимумов вместо полных выборок повысило наглядность графиков.

Спектры на рис. 1 свидетельствуют о том, что наличие носителей фикоцианина в воде сопровождало ослабление обратного-рассеянной солнечной радиации в коротковолновой области видимого спектра в интервале 400–500 нм. Этот эффект очевиден при сравнении панелей (1) и (2) и едва заметен при обращении к панелям (3) и (4). Такое гашение коротковолновой солнечной радиации в спектрах класса WRM = 2443 относительно спектров класса WRM = 443 естественно

объяснить различием состава пигментов в клетках носителей пигментов указанных классов. Здесь амплитуды минимумов Rrs при 443 нм (хлорофилл) на панелях (1) и (2) более или менее сходны, тогда спектры на панели (2) существенно занижены в диапазоне длин волн коротковолновых крыльев спектров поглощения света дополнительными фитопигментами [17].

Карты на рис. 2 дают представление о пространственной дифференциации фитопланктона по отсутствию (панель (1)) и наличию (панель (2)) фикоцианина среди пигментов фитопланктона в Тасмановом море во время пролета СЦО MODIS в ноябре 2019 г. Несмотря на ложную “полосатость”, свойственную показаниям этого СЦО при слабом сигнале [3], здесь к западу от 152° в.д. и к северу от 40° ю.ш. очевидно преобладание пикселей изображения водной поверхности, чьи спектры лишены минимумов, обусловленных наличием фикоцианина. Более того, оценки WRM = 443 на панели (1) воспроизводят здесь контуры ПСЭ, очевидные на картах ТПМ (рис. 3, панель (1)) и FLH (рис. 4, панель (3)). Реальность указанных структур подтверждается тем, что они проявились в распределениях таких стандартных MODIS-ха-

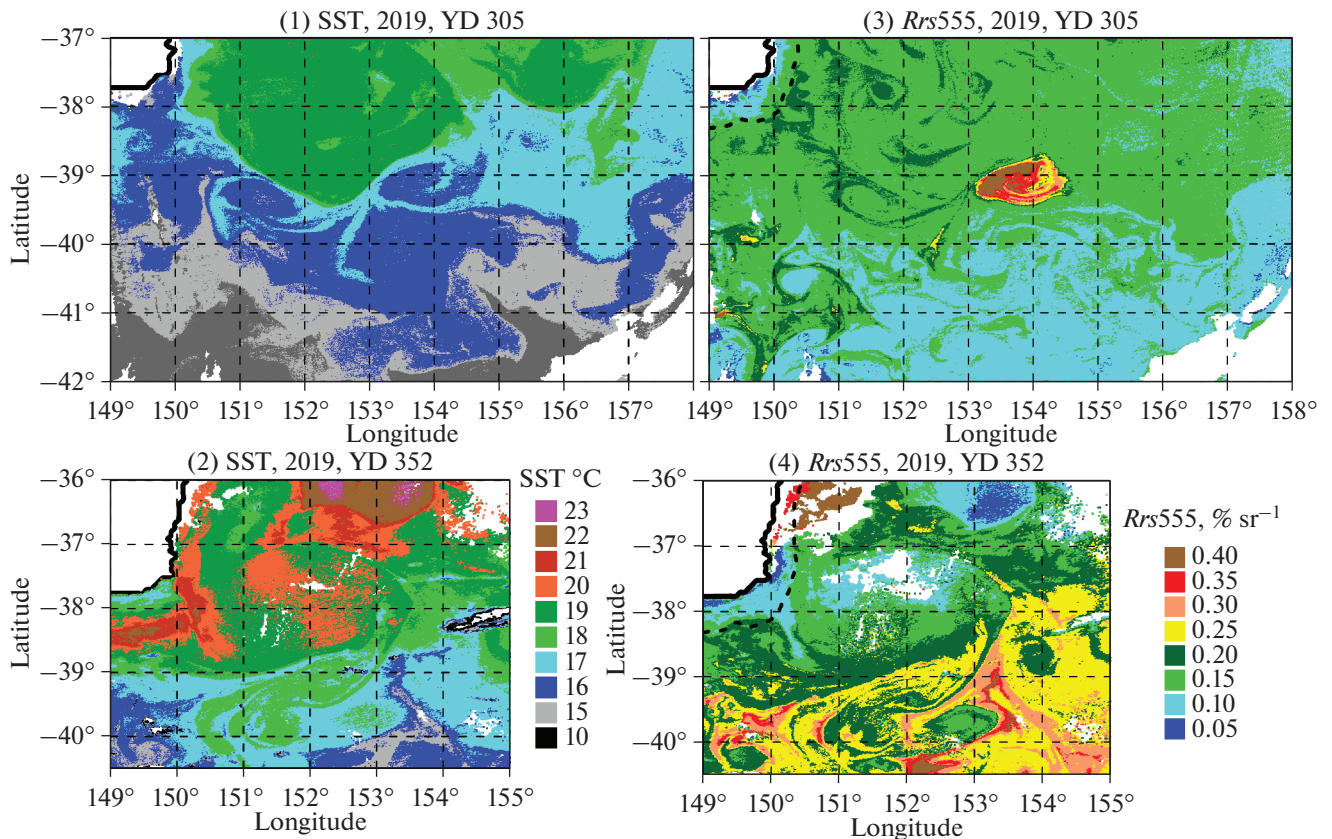


Рис. 3. Распределение температуры водной поверхности ТПМ, °С и яркости обратно-рассеянной солнечной радиации $Rrs(555)$ согласно MODIS-данным от 1 ноября (панели (1) и (3)) и 17 декабря 2012 г. (панели (2) и (4)).

рактических среды, как температура воды T (°С) и спектральная яркость $Rrs(555)$. Последняя служит ориентировочным показателем обилия водной взвеси местного происхождения там, где ничтожны речной сток и поступление эоловой взвеси. В совокупности, эти факты означают, что пара сопряженных эллипсов в поле оптических характеристик, связанных с фитопланктоном, появилась благодаря местным особенностям динамики приповерхностного водного слоя.

Согласованность распределений ТПМ среды с распределениями индексов WRM повышает доверие к ним как показателям зависимости состава фитопигментов от условий обитания их носителей в океане. Западные эллипсы ПСЭ существенно уступали восточным по амплитуде в распределениях $Rrs(555)$ (панель (3) на рис. 3) и chl_a (панель (1) на рис. 4), тогда как западный эллипс FLN в среднем отличается слегка повышенной амплитудой сигнала от восточного (панель (3) на рис. 4).

Карты на панелях (2) и (4) рис. 3 и 4 показывают: спустя полтора месяца после съемки картин на панелях (1) и (3) тех же рисунков место ПСЭ заняли воды с температурой поверхности 18°–19°С,

вклинившиеся в более холодные воды северной периферии Циркумполярного течения (17°–18°С). Границы вклинившихся вод совпали с распределениями оценок $0.7 \leq chl_a \leq 0.9$ и $0.006 \leq FLN \leq 0.008$ в форме поразительно узких “струй” с отношением длины к ширине около 10^2 . При этом западная и восточная “струи” прослеживались по chl_a одинаково четко на всем протяжении клина, тогда как первая из них заметна по FLN лишь к югу от 39° ю.ш. Здесь распределения концентрации хлорофилла, рассчитанные согласно стандартному MODIS-алгоритму, не противоречили структуре распределений FLN, которые служат показателем относительной изменчивости концентрации хлорофилла в приповерхностном слое водных бассейнов.

5.2. Применимость стандартных алгоритмов определения хлорофилла при интенсивном мезомасштабном перемешивании деятельного слоя океана

Природные условия Тасманова моря безусловно соответствуют критериям применимости band-ratio алгоритмов определения концен-

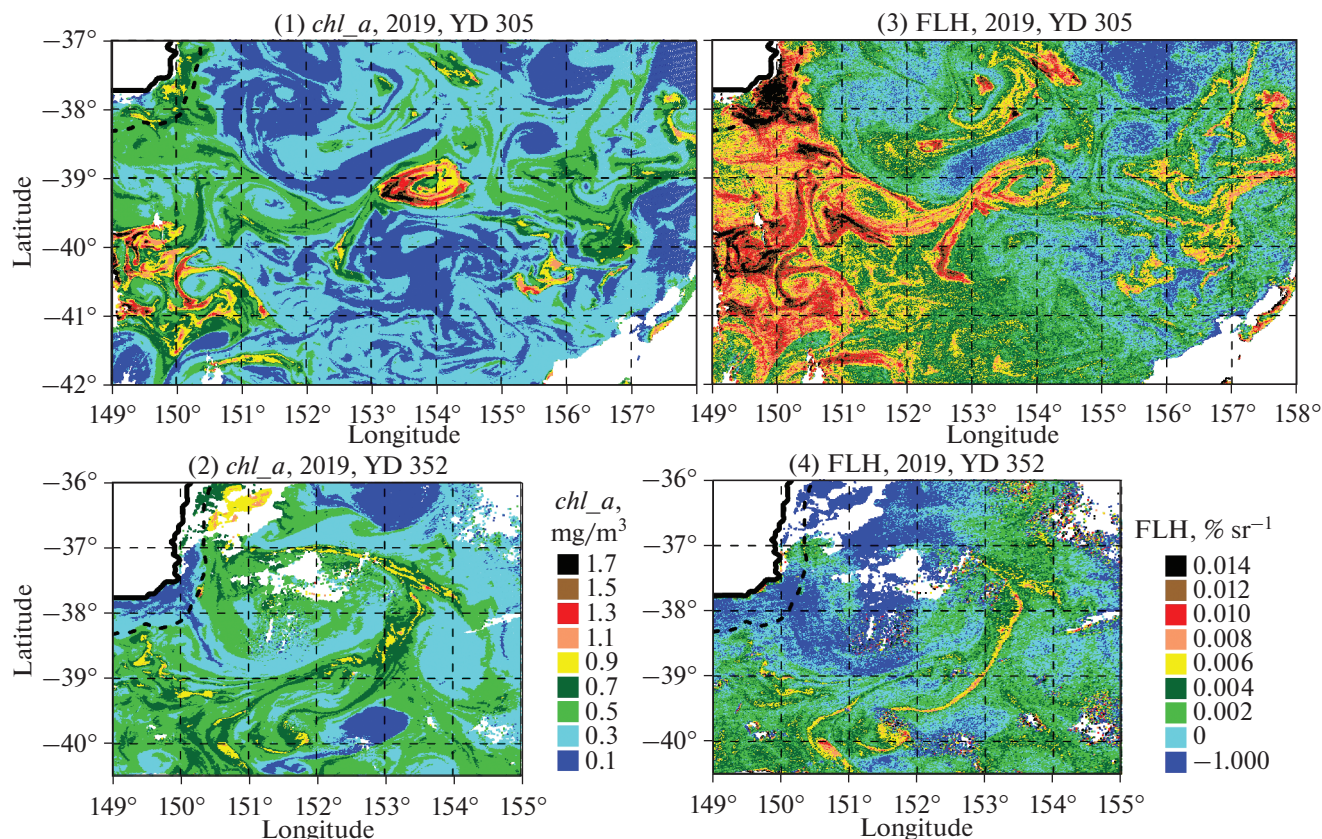


Рис. 4. Распределение оценок chl_a и FLH водной поверхности согласно MODIS-данным от 1 ноября (панели (1) и (3)) и 21 декабря (панели (2) и (4)) 2019 г.

трации хлорофилла в его водах (ничтожность чужеродных оптически-значимых примесей морской воды). Здесь хлорофилл a является единственной примесью морской воды, при наличии которой выполнимо неравенство $FLH > 0$. Но это возможно лишь там, где надпороговые концентрации хлорофилла встречаются не глубже 1 м от водной поверхности. Поэтому сочетание оценок $FLH = 0$ и $chl_a > 0$ допускает двойное толкование надпороговых оценок концентрации хлорофилла chl_a : (1) они указывают на скопления носителей этого пигмента под слоем формирования сигнала FLH или (2) они подозрительны, поскольку могут быть связаны не столько с оптически значимыми примесями, поступающими в воду при разложении фитопланктона (CDOM и взвешенные частицы согласно гипотезе Case1/Case2 waters), сколько с иными факторами изменчивости цветности вод, которые игнорируются указанной гипотезой.

Графики на рис. 1 запечатлели прямое влияние фитопигментов на форму спектров Rrs . Оно выразилось в наличии спектральных минимумов на 443 нм (признак комбинации пигментов, при которой форма спектров обратно-рассеян-

ной солнечной радиации решающим образом зависит от концентрации хлорофилла a) и на 469 нм (то же, но при преимущественном влиянии дополнительных пигментов на форму указанных спектров). Поглощение света CDOM экспоненциально растет с уменьшением длины световой волны, и потому в отсутствие пигментов и при обилии CDOM спектр Rrs выглядит как гладкое колоколообразное распределение с вершиной, смещающейся в длинноволновую область с ростом концентрации CDOM. Форма спектров Rrs указывает на то, что они формировались под влиянием обоих факторов. Например, спектр с $\lambda_{max} = 412$ нм на панели (1) рис. 1 характерен для вод океана с минимальным поглощением света растворенной органикой естественного происхождения (CDOM), но отличается четким минимумом на длине волны 443 нм максимума в спектре поглощения света хлорофиллом. Аналогичный спектр на панели (3) рис. 1 характеризует прозрачные воды океана, в которых свет поглощается не столько хлорофиллом, сколько дополнительными пигментами.

Разнообразие формы спектров Rrs явно связано с обилием спектрально-ярких неоднород-

родностей, изобилующих на картах рис. 2–4. Они свидетельствуют о том, что в водной толще, доступной дистанционному зондированию в видимой области спектра во время пролета СЮ MODIS, сосуществовали локальные разнонаправленные струйно-вихревые течения. Очертания и протяженность их проявлений в распределениях *Rrs* хорошо согласуются с представлениями о Тасмановом море как акватории интенсивной мезомасштабной изменчивости водной среды, где горизонтальным перемещениям водных масс сопутствуют локальные подъемы и опускания вод на временных интервалах, характерных для изменений погодных условий. Как следствие, в этом море локальные очаги роста и убыли численности микроводорослей в фотическом водном слое появляются и исчезают на периодах от часов до суток.

В этих условиях расхождение между оценками относительных изменений FLH и *chl_a* представляется вполне естественным. Первая из характеристик определяется по яркости красной флуоресценции, которая возбуждается солнечным излучением в приповерхностном водном слое не толще метра независимо от иных примесей морской воды, тогда как оценки второй основаны на определениях интенсивности обратно-рассеянной солнечной радиации в окне прозрачности вод океана (400–550 нм), где толщина формирования сигнала *Rrs* составляет $1/K_d$ (т.е. достигает нескольких десятков метров). Ясно, что определения FLH свидетельствуют о явлениях вблизи водной поверхности, тогда как оценки *chl_a* соотносятся с событиями в толще вплоть до сезонного пикноклина, если он залегает не ниже $1/K_d$ метров.

Гораздо коварнее другая причина вероятных расхождений между оценками FLH и *chl_a* как показателями относительной изменчивости хлорофилла. Речь идет о принципиальном недостатке гипотезы Case1/Case2 waters как основы определений *chl_a*. Она предлагает судить о концентрации хлорофилла по содержанию продуктов разложения фитопланктона в фотическом слое океана (водная взвесь и CDOM), но игнорирует тот факт, что длительность существования живых клеток фитопланктона (от часов до суток) ничтожна по сравнению с “временем жизни” минерализованной водной взвеси и CDOM. Оседая со скоростью около метра в сутки, отмершие клетки фитопланктона покидают фотический слой океана гораздо быстрее молекул CDOM. Последние появляются в воде на последних стадиях деградации органических соединений растительного и животного происхождения в морской среде и способны сохраняться в ней в течение многих лет после исчезновения одноклеточных водорослей.

Как следствие, достоверность спутниковых оценок концентрации хлорофилла, основанных на гипотезе Case1/Case2 waters, может быть приемлемой только там, где отсутствию внешних источников оптически значимых примесей сопутствует ничтожность мезомасштабного перемешивания фотического водного слоя.

Размеры и структура распределений физически различных характеристик на рис. 3 и 4 свидетельствует о высокой значимости такого перемешивания в Тасмановом море, известном как акватория чрезвычайно интенсивного мезомасштабного перемешивания деятельного слоя [5]. Здесь отсутствуют внешние источники оптически значимых примесей морской воды и, следовательно, выполняется главное условие применимости оценок концентрации хлорофилла *chl_a* посредством стандартного алгоритма и согласованности их с определениями FLH. Однако в действительности распределения этих величин неплохо совпадают по форме, но радикально различны по амплитуде: на панели (1) рис. 4 восточный эллипс ПСЭ вдвое превышает западный по амплитуде в случае *chl_a*, тогда как на карте (3) там же восточный эллипс немного уступает западному по уровню FLH. Вместе с тем в распределениях *Rrs555* (рис. 3, панель (3)) соотношение амплитуд восточного и западного эллипсов ПСЭ аналогично их соотношению в случае *chl_a* (панель (1) на рис. 4). Такие расхождения вполне естественны, поскольку уровень FLH зависит только от обилия хлорофилла в приповерхностном слое моря (контуры вихрей почти одинаковы по уровню FLH), тогда как в поле обратно-рассеянной солнечной радиации уровень *Rrs* восточного вихря более чем вдвое превышал *Rrs* западного круговорота. Предположительно, направление вращения восточного вихря благоприятствовало подъему глубинных вод к поверхности благодаря экмановской накачке [6] и, как следствие, накоплению светорассеивающей взвеси в этом слое из-за падения скорости ее оседания в сочетании с ускоренным развитием фитопланктона вследствие притока биогенных элементов из подстилающей водной толщи.

Стандартный алгоритм определения *chl_a* находит концентрацию хлорофилла по определениям *Rrs* в интервале длин волн (400–550 нм) в предположении, что эти *Rrs* меняются исключительно под влиянием продуктов разложения фитопланктона в виде CDOM и светорассеивающей взвеси. Спектры на рис. 1 свидетельствуют: в условиях развитого мезомасштабного перемешивания вод океана вдали от источников чужеродных светопоглощающих примесей поглощение света фитопигментами может быть достаточно интенсивным, чтобы непосредственно влиять на форму

спектра *Rrs* в диапазоне от 400 до 700 нм. В этом случае алгоритмы в духе Case1/Case2 waters обречены завышать оценки концентраций хлорофилла, что и является их врожденным недостатком.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ближайшем будущем начнется эксплуатация гиперспектрального сканера цвета океана (проект PACE [14]). Он нацелен на получение изображений водной поверхности с пространственно-временным разрешением подобно MODIS-сканерам, но при спектральном разрешении до 5 нм, гораздо более подходящем для спутникового определения состава фитопигментов в фотическом слое океана по сравнению с разрешением действующих СЦО. Тем не менее, предлагаемый СИП-подход может быть востребован и после запуска проекта PACE, если сохранится доступ к многолетним MODIS-данным и, тем более, если MODIS-сканеры не будут выведены из эксплуатации. Решающее достоинство СИП-подхода состоит в том, что он опирается не на гипотезу, а на физические показатели наличия фитопигментов в воде, обнаружимые уже освоенными средствами. Этот подход сохранит свою привлекательность до полного освоения возможностей проекта PACE и может быть полезен в качестве “мостика” между архивными MODIS-данным и ожидаемыми данными проекта PACE. Они будут опираться на результаты дистанционных определений спектров обратно-рассеянной солнечной радиации глобального охвата со спектральным разрешением, минимально необходимым для определения состава и количества фитопигментов в приповерхностном водном слое в подробностях, недоступных мультиспектральной аппаратуре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bergman B., Sandh G., Lin S. et al. Trichodesmium – a widespread marine cyanobacterium with unusual nitrogen fixation properties // FEMS Microbiol. Rev. 2013. V. 37. P. 286–302. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2012.00352.x>
2. Blondeau-Patissier D., Gower J.F.R., Dekker A.G. et al. 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 // Progr. Oceanogr. 2014. V. 123. P. 123–144.
3. Bouali M., Ladjal S. Toward optimal destriping of MODIS data using a unidirectional variational model // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. 2011. V. 49. № 8. August 2011. P. 2974–2935.
4. Detoni A.V.S., Ciotti A.M. Trichome abundance, chlorophyll content and the spectral coefficient for light absorption of Trichodesmium slicks observed in the Southwestern Atlantic // J. Plankton Res. 2020. V. 42(2). P. 13–139. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbaa009>
5. Everett J.D., Baird M.E., Oke P.R., Suthers P.M. An avenue of eddies: quantifying the biophysical properties of mesoscale eddies in the Tasman Sea // Geophysical Research Letters. 2012. V. 39. L16608. <https://doi.org/10.1029/2012GL053091,2012/>
6. Gaube P., Chelton D.B., Samuelson R.M. et al. Satellite observations of mesoscale eddy-induced Ekman pumping // J. Physical Oceanography. 2015. V. 45. P. 115–132.
7. Hu C., Feng L. Modified MODIS fluorescence line head product to improve image interpretation for red tide monitoring in the eastern Gulf of Mexico // J. Appl. Remote Sens. 2016. V. 11(1). 012003. <https://doi.org/1117/1.JRS.11.012003>
8. Karabashev G.S. Spectral indexation of pixels of MODIS sea surface images for detecting inconstancy of phytoplankton composition in water // Oceanologia. 2021. V. 63(4). P. 482–496. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2021.06.001>
9. Karabashev G.S. Spectral indexing of MODIS-Image pixels to reveal the variability in the phytoplankton composition in the sea under the influence of mesoscale water dynamics // Oceanology. 2021. V. 61. № 6. P. 861–871. <https://doi.org/10.1134/S0001437021060242>
10. Mobley C.D. Radiative transfer in the ocean // Encyclopedia of ocean sciences. 2011, 2nd ed. V. 4. P. 619–628. Elsevier Ltd. Steele, J.H., Turekian, K.K., Thorpe, S.A. (Eds.), London: Academic Press.
11. Mobley C.D., Stramski D., Bisset W.P., Boss E. Optical modeling of ocean water. Is the Case 1-Case 2 classification still useful? // Oceanography. 2004. V. 17 (2). P. 60–67.
12. Morel A. Optical modeling of the upper ocean in relation to its biogeochemical matter content (Case 1 waters) // J. Geophys. Res. 1988. V. 93. № C9. P. 10749–10768.
13. Morel A., Gentili B., Chamu M., Ras J. Bio-optical properties of high chlorophyll Case 1 waters and of yellow-substance-dominated Case 2 waters // Deep Sea Res. 2006. V. 53. Iss. 9. P. 1439–1459. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2006.07.007>
14. Schollaert Uz.S., Kim G.E., Mannino A. et al. Developing a community of practice for applied uses of future PACE data to address marine food security challenges // Front. Earth Sci. 2019. V. 7:283. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00283>
15. Sheberstov S., Lukyanova E. A system for acquisition, processing and storage of satellite and field biooptical data // In: Proc. IV Int. Conf.: Current Problems in Optics of Natural Waters. 2007. Nizhny Novgorod, September 11–15. P. 179–183.
16. Waugh D.W., Abraham, E.R., Bowen M.M. Spatial variations of stirring in the surface ocean: a case study of the Tasman Sea // Journal of Physical Oceanography. 2006. V. 36. P. 526–542.
17. Wozniak B., Dera J. Light Absorption in Sea Water. 2007. Springer Science, Business Media, New York, 463 p.

Effects of Mesoscale Stirring on Phytopigment Determinations in the Photic Water Layer from Multispectral Ocean Color Data (The Case of the Tasman Sea)

G. S. Karabashev[#]

P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Moscow, Russia

[#]*e-mail: genkar@mail.ru*

The inconstancy of phytopigment composition during intensive mesoscale mixing of the Tasman Sea photic layer was investigated using MODIS images of its surface. To do this, each pixel of such an image is assigned a WRM index equal to the sum of the wavelengths of the minima in the reflectance spectrum of the water surface within the boundaries of a pixel on the ground (Spectral Indexing of Pixels, or SIP approach). WRM is acceptable as an indicator of phytopigment composition variability in the water column, since the attenuation of light by water as a solvent and by its admixtures of other nature is inferior to light absorption by phytopigments in spectral selectivity, while the composition of phytopigments in the aquatic environment depends on the species composition of local phytoplankton. A co-analysis of WRM distributions and characteristics of Tasman Sea waters showed that with increased mesoscale variability in open ocean waters, phytopigment content in the near-surface layer reaches levels at which minimums of pigment origin at 400–550 nm, discernible by multispectral ocean color scanners, occur in the backscattered solar radiation spectrum. This phenomenon is ignored by common algorithms for chlorophyll determination based on the data of multispectral ocean color scanners (band-ratio algorithms) and, apparently, is one of the reasons for the known tendency of such algorithms to overestimate chlorophyll concentration relative to its real content in the water column. The conclusion is applicable to any ocean basins if they, like the Tasman Sea, are not affected by external sources of optically significant admixtures in water.

Keywords: MODIS, Tasman Sea, mesoscale stirring, inconstancy of phytopigments, photic water layer