

ОБЪЕКТИВНАЯ КЛАСТЕРИЗАЦИЯ СПЕКТРОВ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЯРКОСТИ КАК ПРЕДПОСЫЛКА НЕСМЕЩЕННОСТИ ОЦЕНОК БИО-ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОД НА ДИНАМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ АКВАТОРИЯХ

Г.С. КАРАБАШЕВ

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2018-0002). Стандартные алгоритмы спутниковых оценок био-оптических характеристик вод океана опираются на гипотезу Case I / Case II waters. Она лежит в основе общепринятых био-оптических алгоритмов определения хлорофилла по форме спектра коэффициента яркости R_{rs} в открытом океане на том основании, что хлорофилл принадлежит фитопланктону как единственному источнику окрашенной растворенной органики (ОРОВ) и других оптически-значимых примесей в морской воде (Moblely *et al.*, 2004). Исследования в зоне схождения Бразильского и Мальвинского (ЗСБМ) течений в ЮЗ Атлантике выявили чрезмерную смещенность спутниковых оценок хлорофилла там, где доминируют воды типа Case I по любым критериям (Karabashev, Evdoshenko, 2018)). Доклад посвящен выяснению причин этого противоречия.

Сенсор MODIS превосходит другие мультиспектральных сканеров цвета океана по числу коротковолновых каналов. Канал с максимумом чувствительности на 443 нм настроен на полосу поглощения хлорофилла *a*. Появление минимумов на 443 и 488 нм в спектре элемента изображения указывает на сосуществование хлорофилла и доп. пигментов в сравнимых количествах. В зависимости от своей ширины, минимум на 469 нм служит индикатором различных комбинаций фитопигментов. Отсутствие минимумов ("гладкий" спектр) трактуется как отсутствие пигментов в толще формирования восходящей яркости моря. Таким образом, возможности попиксельной диагностики пигментов с помощью сканера MODIS исчерпываются следующими градациями (кластерами): отдельные минимумы на 443, 469 и 488 нм, совместные минимумы на 443 и 488 нм и случаи отсутствия пигментных минимумов. Влияние ОРОВ на форму спектров R_{rs} удобно оценивать по длине волны максимума λ_{max} спектра коэффициента яркости. Она определяется напрямую по совокупности оценок R_{rs} от 412 до 678 нм и смещается к красной границе спектра с ростом содержания ОРОВ в воде.

Выявление связи пигментных минимумов (ПМ) с мезомасштабными структурами по спутниковым данным возможно, если (1) имеются MODIS-снимки тест-площадки, где потери данных из-за облачности и иных помех не препятствуют распознаванию таких структур и (2) кластеризации спектров пикселей по ПМ достаточно чувствительна к малым различиям оценок R_{rs} смежными каналами сканера. Этим требованиям отвечает оригинальная процедура отбора и обработки данных. Она предусматривает:

1. Загрузку MODIS-снимков тест-площадки в ЗСБМ от 46.5° S, 59° W до -42° S, 54° W с портала NASA.
2. Создание таблицы атрибутов доброкачественных пикселей выбранного снимка в браузере SMCS С.В. Шеберстова. Строка таблицы хранит координаты пикселя и его коэффициенты яркости R_{rs} на длинах волн 412, 443, 469, 488, 531, 547, 555, 645, 667 и 678 нм вместе концентрацией хлорофилла chl_a по стандартному алгоритму.
3. Удаление пикселей с выбросами (критерий 3σ) и оценками $R_{rs} < 0$.
4. Попиксельную оценку индекса $ALH = R_{rs}(412) + 0.54 \times [R_{rs}(469) - R_{rs}(412)] - R_{rs}(443)$

как показателя содержания хлорофилла *a* в воде по дефициту солнечного излучения в полосе поглощения хлорофилла (аналог индекса хлорофилла FLH по флуоресценции).
 5. Кластеризацию пикселей снимка по длине волны максимума спектра λ_{\max} (412, 443, 469, 488, 531 или 547 нм) и по наличию минимумов на длинах волн от 443 до 488 нм в комбинациях (1) на 443 нм, хлорофилл, (кластер Rrsm(443)); (2) на 443 и 488 нм, хлорофилл и доп. пигменты (кластер Rrsm(450)), (3) на 469 нм, множество пигментов (Rrsm(469)), (4) на 488 нм, дополнительные пигменты (кластер Rrsm(488)), (5) минимумы отсутствуют (кластер Rrsm(333)).

Такие кластеры находили по логическим суммам неравенств смежных оценок Rrs, описывающим форму спектра отдельного пикселя от 412 до 555 нм. Операции по пп. 3-5 выполнялись с помощью оригинальных MATLAB-скриптов.

Описанная процедура применена к десяти декабрьским снимкам тест площадки, полученным сенсором MODIS-A с 2002 по 2014 г. (начало лета южного полушария) и выявила две противоречивые особенности: 1) нередкая пространственная перемежаемость пикселей со спектрами разных типов и 2) достаточно частое появление областей, занятых пикселями со спектрами одного и того же типа (спектральная однородность).

Спектрально-однородные области обычно совпадают с элементами мезомасштабных вихрей, струй и других крупных структур на изображениях тест-площадки в полях TPO и Rrs(555) (индикатор мутности вод). Примером тому служит изображение тест-площадки от 2 декабря 2014 г. (рис. 1). Здесь периферия циклона А занята водами повышенной мутности и пикселями класса Rrsm443 с $\lambda_{\max} = 412$ нм. Внутреннее пространство циклона отличается преобладанием пикселей класса Rrsm333 слабой мутностью.

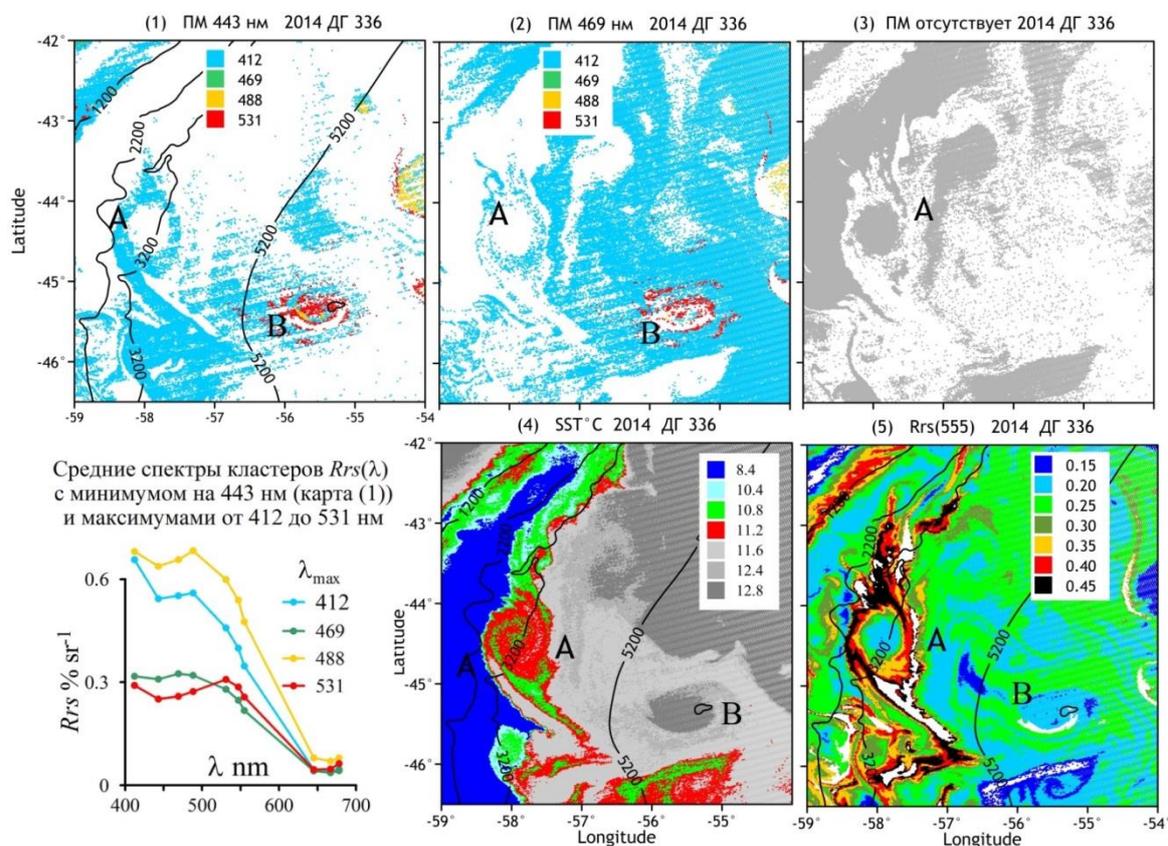


Рис. 1 Карта (1) и график 4: Пигментные минимумы (ПМ) на 443 нм в спектрах пикселей снимка тест-площадки. Карта (2): ПМ на 469 нм. Карта (3): пиксели без ПМ. Карта (4): распределение SST °C (4). Карта (5): распределение коэффициента яркости Rrs(555) как индекс мутности вод. Литеры А и В метят общие структуры на картах разных характеристик.

Замечательный образец пространственного разделения пикселей мультиспектрального изображения поверхности океана по типу ПМ был получен при обработке снимка от 6 декабря 2008 г. (Рис. 2).

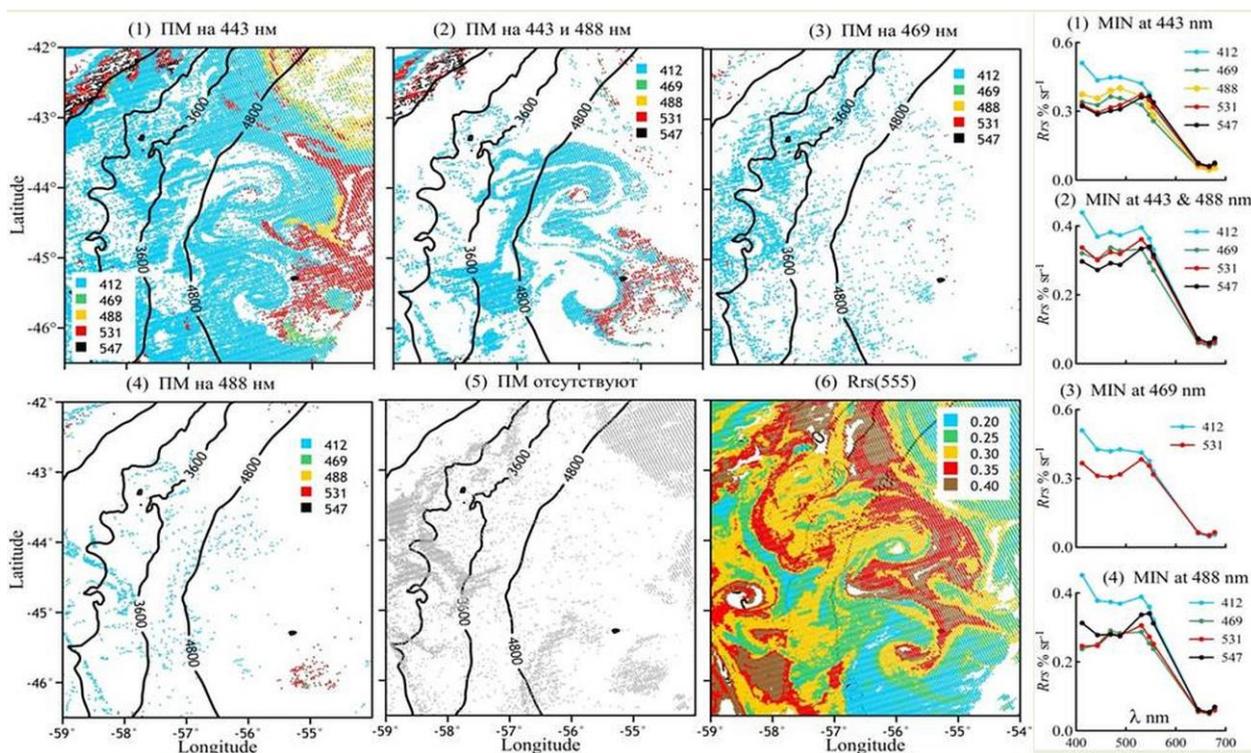


Рис. 2. Фрагмент тест-площадки с вихревым диполем (карта (2)) на снимке от 6 декабря 2008 г. (1): пигментные минимумы (ПМ) класса Rrsm 443. Цвет кодирует длину волны λ_{max} . Средние спектры кластеров по λ_{max} показаны на графике (1). (2) - (4): то же, но для ПМ класса Rrsm450 (график 2), Rrsm469 (график 3) и Rrsm488 (график 4), (5): Rrsm333. (6): коэффициент яркости Rrs(555) (прокси мутности вод).

Существенно, что диполь визуализируется пигментной составляющей яркости, но он почти не различим в поле мутности на карте Rrs(555).

Главная особенность картин на рис. 3 – обилие пикселей класса Rrsm443 с λ_{max} на 531 и 547 нм. Спектры с такими λ_{max} характерны для Балтики, побережий и прочих регионов, где воды богаты растворенной органикой. Ее показатель поглощения растет с уменьшением длины волны света по экспоненте. По крайней мере три типа спектров с $\lambda_{max} = 412, 531$ и 547 нм на графике 4 несовместимы с этой закономерностью, поскольку у них $Rrs(412) > Rrs(469)$. Это неравенство вполне естественно при поглощении света пигментами фитопланктона, т.к. их коротковолновые спектры выглядят как одновершинные распределения с $\lambda_{max} > 412$ нм.

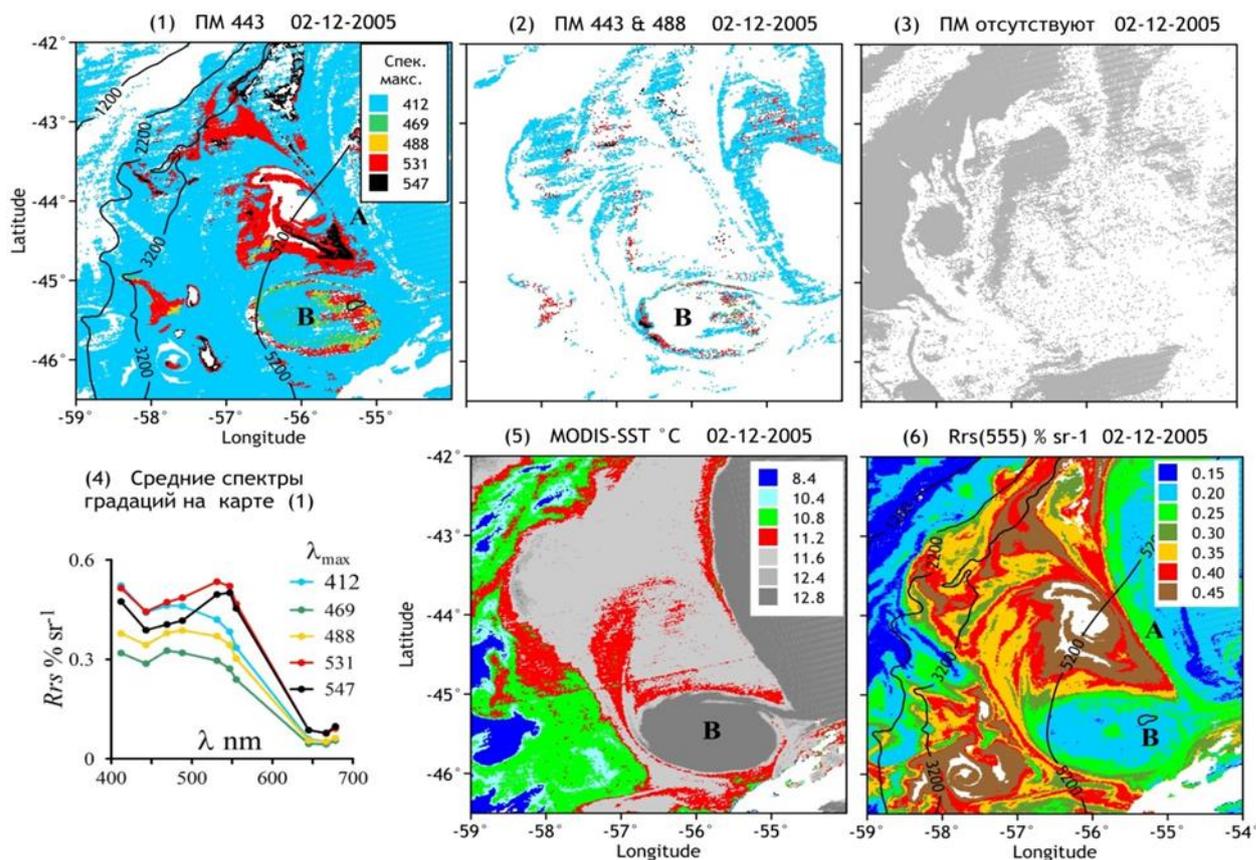


Рис. 3. Распределения пикселей классов Rrsm443 (1), Rrsm450 (2), и Rrsm333, а также ТПО (5) и мутности (6) по данным снимка тест-площадки от 2 декабря 2005 г. График (4) служит ключом для истолкования карт (1) и (2).

Десять приемлемых снимков тест-площадки за 15-летний период наблюдений сканера MODIS явно недостаточны для количественной оценки воспроизводимости принятой схемы обработки и анализа данных. Однако среди изображений тест-площадки оказалась пара снимков сравнимого качества, полученных с четырехсуточным интервалом в 2011 г. Они демонстрируют вполне удовлетворительную воспроизводимость преобладания кластера Rrsm469 на всей тест-площадке в течение 4 суток (рис. 4). Судя по всей

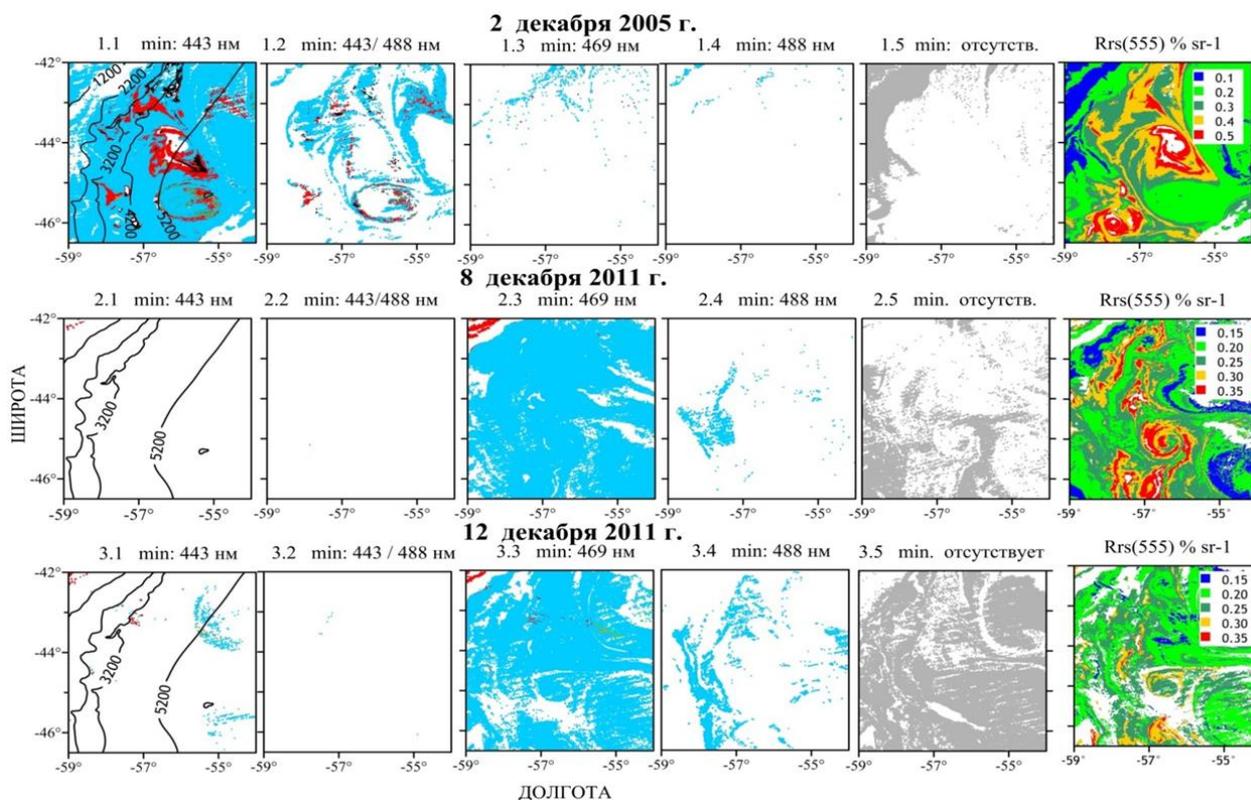


Рис. 4. MODIS-A, снимки тест-площадки как показатель воспроизводимости результатов обработки данных. Столбцы таблицы карт тест-площадки показывают распределения пикселей классов $R_{rsm}(443)$ (1.1-3.1), $R_{rsm}(450)$ (1.2-3.2), $R_{rsm}(469)$ (1.3-3.3), $R_{rsm}(488)$ (1.4-3.4), $R_{rsm}(333)$ (1.5-3.5) и соответствующих распределений $R_{rs}(555)$ как индикаторов распределения мутности верхнего слоя океана.

совокупности данных, кластер $R_{rsm}469$ значительно уступает кластеру $R_{rsm}443$ по встречаемости на акватории тест-площадки летом южного полушария. С другой стороны, радикальная смена видового состава фитопланктона за несколько суток на акватории с поперечником в сотни миль не согласуется с современными представлениям темпе подобных изменений в природе. На этих основаниях удовлетворительная воспроизводимость декабрьских распределений $R_{rsm}469$ в 2011 г. служит весомым доводом в пользу достоверности полученных результатов в целом.

Рис. 5 демонстрирует независимость оценок C_{ALH} и $R_{rs}(555)$ от λ_{max} , тогда как гистограммы chl_a систематически смещались к завышенным концентрациям хлорофилла с ростом λ_{max} . Как и на снимке от 02-12-2005 (Рис. 3), здесь в спектрах массовых классов пикселей соблюдалось условие $R_{rs}(412) > R_{rs}(469)$, при котором фактором формирования коротковолнового крыла спектра R_{rs} могут быть только пигменты фитопланктона, а не ОРОВ любого происхождения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Согласно представленным материалам, пигменты живого фитопланктона в водах открытого океана могут быть дополнительной причиной неприемлемо сильной смещенности оценок концентрации хлорофилла, рассчитанной согласно алгоритмам на основе гипотезы Case1 - Case 2 waters. Эта возможность реализуется на акваториях с интенсивным мезомасштабным водообменом, благодаря которому слой формирования

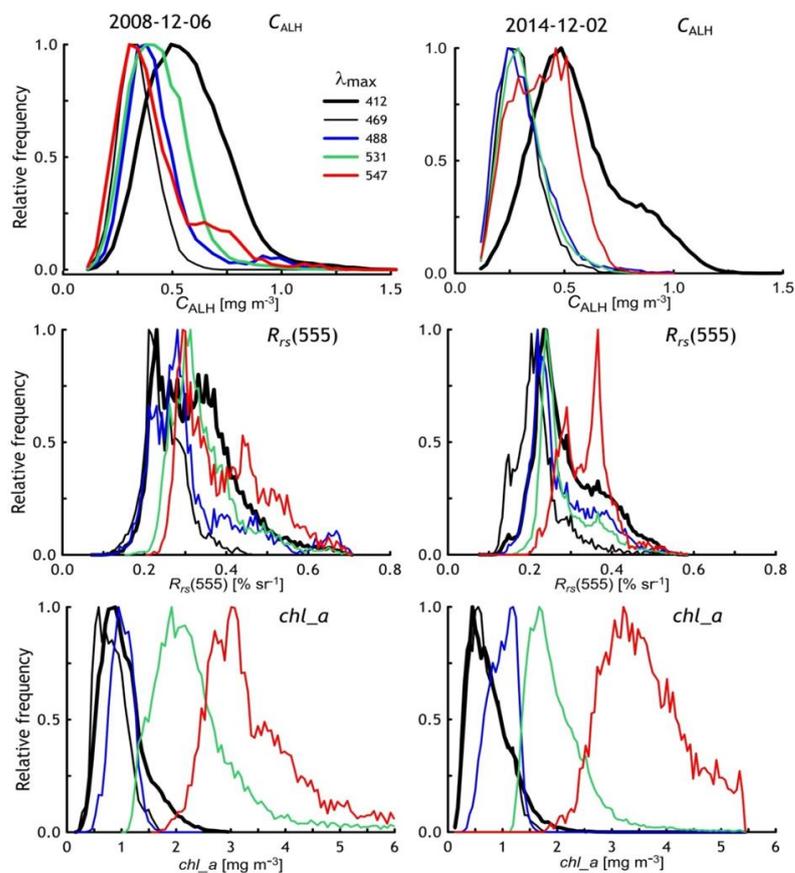


Рис. 5. Относительная частота оценок концентрации хлорофилла C_{ALH} по индексу ALH, коэффициента яркости $R_{rs}(555)$ и концентрации хлорофилла chl_a по MODIS-алгоритму. Графики построены по данным снимков тест-площадки от 2008-12-06 и 2014-12-02 с использованием пикселей класса Rrsm(443) в спектрах с $412 \leq \lambda_{max} \leq 547$ нм. Большие λ_{max} свидетельствуют о сильном поглощении сине-фиолетовых лучей.

восходящей яркости моря обогащается живым фитопланктоном, и его пигменты становятся сравнимы с ОРОВ по влиянию на спектры коэффициента яркости. Критерий $R_{rs}(412) > R_{rs}(469)$ легко ввести в стандартные процедуры обработки данных с тем, чтобы приспособить их к ситуациям с различным соотношением вкладов пигментов и ОРОВ. Однако главная трудность кроется в непредсказуемости и скоротечности мезомасштабных событий и вызываемых ими цветений фитопланктона, если ориентироваться на подспутниковые наблюдения как основу верификации искомых алгоритмов.

Mobley, C.D., Stramski, D., Bissett, W.P., Boss, A. 2004. Is the Case1-Case2 Classification Still Useful? *Oceanography*, June, pp. 62-67.

Karabashev, G.S., Evdoshenko M.A. 2018. Narrowband shortwave minima of multispectral reflectance as indication of algal blooms associated with the mesoscale variability in the Brazil-Malvinas Confluence. *Oceanologia*. V. 60, № 4. pp. 527–543.
<https://doi.org/10.1016/j.oceano.2018.04.003>