

УДК 551.463.5

РАСЧЕТ УГЛА ЦВЕТНОСТИ И ПЕРВИЧНЫХ ГИДРООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОД ЧЕРНОГО И АЗОВСКОГО МОРЕЙ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ СКАНЕРОВ ЦВЕТА

© 2025 г. Е. Н. Корчемкина*, Е. В. Маньковская

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия***e-mail: korchemkina@mhi-ras.ru*

Поступила 04.07.2024 г.

После доработки 11.09.2024 г.

Принята к публикации 03.10.2024 г.

В работе по спутниковым (MODIS, OLCI) и натурным измерениям коэффициента яркости за 2019–2023 гг. рассчитываются углы цветности вод Черного и Азовского морей. Коэффициент корреляции “спутникового” и “натурного” углов цветности составляет 0.92. Для района исследований предложено разделение спектров коэффициента яркости на подгруппы по величинам угла цветности. Проведено сопоставление показателей поглощения растворенным органическим веществом (включая поглощение детритом) и показателей рассеяния назад взвешенными частицами, рассчитанных по спутниковым данным тремя способами: по эмпирическим формулам для угла цветности, по полуаналитическому алгоритму для спектрального коэффициента яркости и по стандартному спутниковому алгоритму (модель GIOP). Эмпирическое соотношение лучше восстанавливает поглощение растворенным органическим веществом, чем стандартный спутниковый или полуаналитический алгоритмы, в то время как для восстановления рассеяния назад взвешенными частицами все три метода показывают аналогичные по качеству результаты.

Ключевые слова: угол цветности, коэффициент яркости моря, цвет моря, поглощение растворенным органическим веществом, рассеяние назад взвешенным веществом

DOI: 10.31857/S0030157425010034, **EDN:** DRHGLK

ВВЕДЕНИЕ

Цвета природных вод Мирового океана заметно различаются в зависимости от состава вод и условий освещения. Основными компонентами (примесями) морской воды, влияющими на ее окраску, являются фитопланктон (его пигменты), взвешенные частицы минерального и органического происхождения и растворенные органические вещества (в основном, гуминовые кислоты). Содержание оптически активных компонентов в различных водоемах может изменяться значительно. Особенно часто это наблюдается в прибрежных водах, подверженных влиянию речного и антропогенного стока, а также в периоды интенсивного развития фитопланктонных организмов.

Видимый зрением человека цвет моря может быть выражен математически через цветовые координаты и угол цветности. Эти величины можно рассчитать непосредственно по спектральной форме коэффициента яркости (КЯ) толщи вод

и стандартным колориметрическим функциям трехкомпонентного зрения человека [17]. В свою очередь, спектр коэффициента яркости может быть получен с помощью контактных измерений или рассчитан по данным спутникового дистанционного зондирования. Большинство спутниковых сканеров цвета океана измеряют яркость восходящего излучения (Water Leaving Radiance) многоканальными спектрометрическими приборами в ограниченном количестве (от 5 до 10) узких полос (≈ 10 нм) видимого излучения. Это основной параметр дистанционного зондирования “цвета океана” [1].

В предыдущей статье [3] по натурным данным измерений спектров коэффициента яркости в 2019 и 2021 гг. были рассчитаны значения угла цветности для вод Черного моря. Также были получены эмпирические соотношения угла цветности с показателем поглощения растворенным органическим веществом и с показателем рассеяния назад частицами взвешенного вещества, поскольку в Черном и Азовском морях именно эти

две примеси оказывают доминирующее воздействие на оптические свойства вод [6].

В настоящей работе значения угла цветности рассчитываются по данным дистанционного зондирования коэффициента яркости моря. Для восстановления спектрального распределения коэффициента яркости по данным его измерений в отдельных спутниковых каналах используются ортогональные функции, полученные по данным контактных измерений КЯ в последние годы (2019, 2021, 2023) в водах Черного моря.

Цель работы – оценить качество расчета угла цветности по спутниковым данным и провести сопоставление показателей поглощения растворенным органическим веществом и показателей рассеяния назад взвешенными частицами, рассчитанных по спутниковым данным различными способами, а именно: по эмпирическим формулам для угла цветности из [3], по полуаналитическому алгоритму для спектрального КЯ [5], по модели GIOP по спутниковым данным [8, 19, 20].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Натурные оптические данные были получены в шести рейсах НИС “Профессор Водяницкий” в северо-восточной части Черного моря в 2019–2023 гг. Положения станций без разделения по рейсам (многие станции повторяются) показаны на рис. 1. Количество данных и даты выполнения измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1. Даты рейсов и количество измерений

№ рейса	Даты	Число натурных измерений	Число спутниковых измерений MODIS	Число спутниковых измерений OLCI
106	19.04–11.05.2019	101	54	20
116	22.04–15.05.2021	85	22	38
117	30.07–07.08.2021	19	17	16
119	03.09–18.09.2021	18	14	14
126	16.03–31.03.2023	9	4	6
127	14.06–06.07.2023	88	50	47

Оптические измерения на каждой станции заключались в измерении коэффициента яркости моря в спектральном диапазоне 390–750 нм. Все измерения проводились в дневное время, в условиях отсутствия (или малой) облачности и волнения до 3-х баллов. Для измерений использовался спектрофотометр, разработанный в МГИ (Морской гидрофизический институт) РАН в Отделе оптики и биофизики моря. Прибор, процесс выполнения измерений и обработки данных подробно описаны в работах [4, 12].

Спутниковые данные оптических сканеров цвета моря MODIS/Aqua, MODIS/Terra,

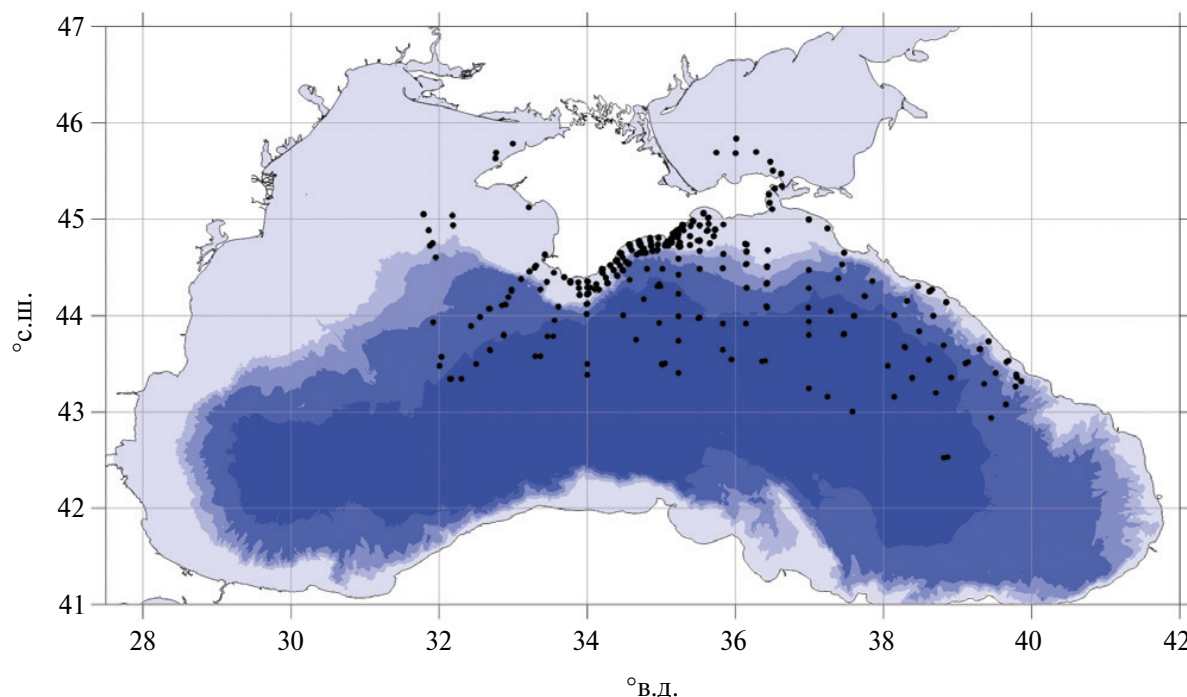


Рис. 1. Схема расположения оптических станций, где проводились измерения во время рейсов НИС “Профессор Водяницкий” в 2019–2023 гг.

OLCI/Sentinel-3A, OLCI/Sentinel-3B уровня 2 получены с веб-сайта Ocean Color Web [14]. Спутниковые и натурные данные отбирались так, чтобы время совпадало в пределах 3-х часов, а координаты — с точностью до 0.01° для сканера MODIS и с точностью 0.002° для OLCI. Основными флагами для отбраковки данных считались STRaylight (засветка), ATMFAIL (несрабатывание алгоритма атмосферной коррекции) и HIGLINT (блик). Спектральный коэффициент яркости моря R_{rs} уровня 2 в 10-ти оптических каналах для MODIS (412, 443, 469, 488, 531, 547, 555, 645, 667 и 678 нм) и в 11-ти каналах для OLCI (400, 412.5, 442.5, 490, 510, 560, 620, 665, 673.75, 681.25, 708.75 нм) осреднялся по квадрату 3×3 пикселя, затем умножался на π для получения безразмерных величин, соответствующих измерениям *in situ*. Количество станций показано в таблице 1.

Дискретность измерений спектрального КЯ *in situ* составляет 5 нм. По натурным измерениям КЯ (табл. 1) рассчитаны ортогональные функции, с помощью которых восстановлены спектры R_{rs} по данным MODIS и OLCI также с дискретностью 5 нм. По натурным и спутниковым данным о спектральном коэффициенте яркости моря рассчитаны углы цветности вод.

Угол цветности водоема — это параметр, используемый для описания цвета в системе цветопередачи CIE [17]. Для его расчета по спектру коэффициента яркости первоначально определяются координаты цветности x, y, z в колориметрической системе X, Y, Z по формулам

$$X = \int_{400}^{700} R_{rs}(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda; \quad x = X/(X + Y + Z);$$

$$Y = \int_{400}^{700} R_{rs}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda; \quad y = Y/(X + Y + Z);$$

$$Z = \int_{400}^{700} R_{rs}(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda; \quad z = Z/(X + Y + Z);$$

где $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ — функции спектральной чувствительности человеческого глаза. Далее угол цветности α (в градусах) определяется выражением

$$\alpha = (180/\pi) \arctg((y - y_w)/(x - x_w)) \bmod 2\pi,$$

где $x_w = y_w = 1/3$ — координаты точки белого цвета на диаграмме цветности (рис. 2). Сине-зеленому и синему цветам соответствуют углы цветности, превышающие 180° .

Показатели поглощения растворенным органическим веществом (РОВ), включая поглощение детритом $a_{org}(440)$, и показатели рассеяния

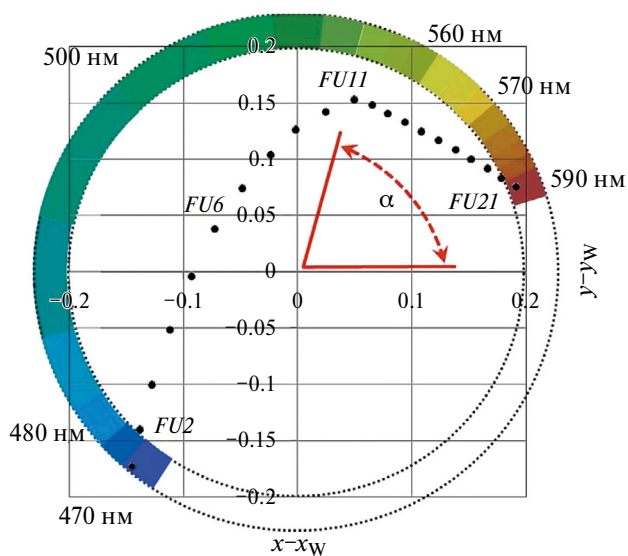


Рис. 2. Диаграмма цветности, показывающая соответствие угла цветности α относительно точки белого (x_w, y_w) цветов шкалы FU (Фореля-Уле) [18, с. 25667].

назад взвешенными частицами $b_{bp}(550)$ рассчитаны по спутниковым данным R_{rs} тремя способами:

(1) по эмпирическим формулам для угла цветности α из [3]:

$$a_{org}(440) = -0.001\alpha + 0.243; \quad R = 0.70,$$

$$b_{bp}(550) = -2.8 \cdot 10^{-4}\alpha + 0.062; \quad R = 0.77,$$

(2) по полуаналитическому алгоритму для спектрального КЯ [5], в котором спектр коэффициента яркости имеет вид

$$R_{rs}(\lambda) = k \frac{b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(550)(550/\lambda)^\nu}{a_w(\lambda) + C_{ph} a_{ph}^*(\lambda) + a_{org}(440)e^{-S(\lambda-440)}},$$

где $k = 0.15$, $b_{bw}(\lambda)$ — показатель рассеяния назад чистой водой [13], $a_w(\lambda)$ — показатель поглощения чистой водой [16], $a_{ph}^*(\lambda)$ — спектр удельного поглощения пигментами фитопланктона (нормированный на концентрацию хлорофилла-*a*) [10], $\nu = 1$ — спектральный наклон рассеяния назад, зависящий от размера частиц [7], $S = 0.018$ — спектральный наклон показателя поглощения света РОВ [9], $b_{bp}(550)$ — показатель рассеяния назад взвешенными частицами на длине волны 550 нм, C_{ph} — концентрация пигментов фитопланктона и $a_{org}(440)$ — показатель поглощения РОВ на длине волны 440 нм;

(3) по стандартному спутниковому алгоритму (модель GIOP [8, 19, 20]), т.е. величины представляют собой конечный спутниковый продукт (Level 3). Использованы величины adg_443 (показатель поглощения окрашенным растворенным и взвешенным веществом на длине волны 443 нм)

в качестве поглощения суммарной неживой органикой, а также bbp_{443} (показатель рассеяния назад частицами взвеси на длине волны 443 нм) и bbp_s (спектральный наклон bbp) для расчета $b_{bp}(550)$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее нами было отмечено, что спутниковые спектральные величины R_{rs} в среднем занижены по сравнению с натурными примерно на 20%, что приводит к последующей неверной оценке первичных гидрооптических характеристик (ПГХ) [2, 11]. Однако форма спектра при этом не искажается, а именно она в итоге определяет цветные характеристики вод.

Значения угла цветности, рассчитанные по натурным данным о КЯ ($\alpha_{in situ}$) и рассчитанные по восстановленным по спутниковым данным MODIS и OLCI спектрам R_{rs} ($\alpha_{satellite}$), очень хорошо согласуются (рис. 3), коэффициент корреляции $R = 0.92$. Обратим внимание, что здесь и далее в статье индексы “*in situ*” и “*satellite*” относятся к измерениям КЯ, а не самих показателей, к которым они относятся.

Представленные на рис. 3 результаты показывают, что можно использовать угол цветности для выделения спектров в подгруппы, которые различаются по своим оптическим свойствам и имеют

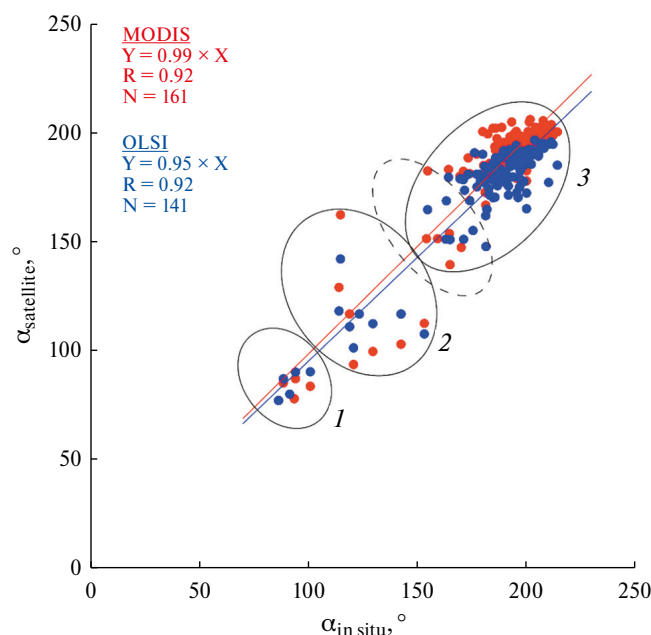


Рис. 3. Сравнение значений угла цветности, рассчитанных по данным натурных измерений КЯ ($\alpha_{in situ}$) и по спутниковым данным R_{rs} ($\alpha_{satellite}$); красные точки — данные MODIS/Aqua, MODIS/Terra, синие — OLCI/Sentinel-3A, OLCI/Sentinel-3B. Овалами и римскими цифрами обозначены подгруппы спектров КЯ (возможная промежуточная подгруппа обозначена штриховой линией). Прямые — линии регрессии.

различный состав вод. На рисунке отмечены три такие подгруппы: I — со значениями $\alpha < 100^\circ$, II — $100^\circ < \alpha < 155^\circ$ и III — $\alpha > 155^\circ$. Можно также выделить еще одну промежуточную подгруппу (штриховая линия) со значениями $155^\circ < \alpha < 175...180^\circ$. Воды указанных подгрупп различаются влиянием взвешенного вещества и неживого органического вещества (растворенная форма и детрит) на КЯ, от большего к меньшему. Соответственно отличаются формы спектров КЯ для выделенных подгрупп (рис. 4).

На пространственном распределении значений угла цветности (рис. 5) выделенным подгруппам соответствуют: воды Азовского моря с минимальными $\alpha < 100^\circ$, где максимально влияние РОВ и взвешенного вещества на оптические свойства морской воды; воды Керченского пролива и возле крупных городов (Евпатория, Севастополь, Ялта, Сочи, Туапсе) — с $100^\circ < \alpha < 155^\circ$; остальная большая часть вод моря — с $\alpha > 155^\circ$, где влияние вышеуказанных примесей минимально, но локально выделяются зоны с повышенным содержанием РОВ или взвешенного вещества, которые соответствуют значениям $155^\circ < \alpha < 180^\circ$.

Результаты расчета показателей рассеяния назад взвешенными частицами $b_{bp}(550)$ по спутниковым данным R_{rs} показаны на рис. 6. Красным цветом показаны значения, полученные стандартным спутниковым алгоритмом (3) для сканеров MODIS и OLCI. В обоих случаях алгоритм дает заниженные показатели $b_{bp}(550)$. Синий цвет соответствует значениям, полученным по полуаналитическому алгоритму для спектрального КЯ (2). Алгоритм хорошо восстанавливает

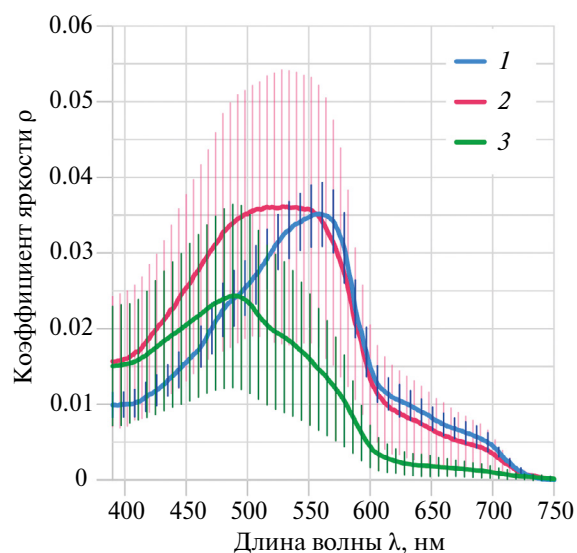


Рис. 4. Средние спектры КЯ и их среднеквадратические отклонения (показаны штриховкой) для трех подгрупп, выделенных по углу цветности вод.

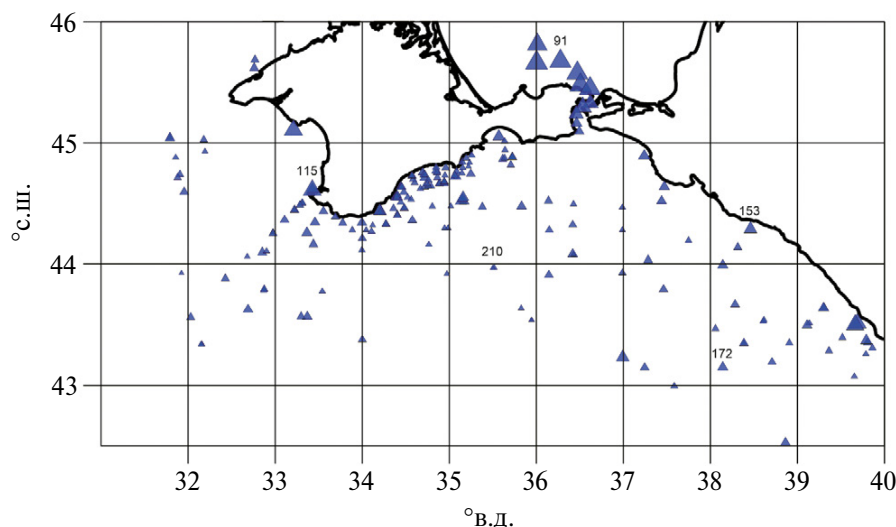


Рис. 5. Распределение величин угла цветности. Размеры символов соответствуют диапазону углов от 80° до 220°, больший размер соответствует меньшему углу. Для примера обозначены некоторые величины углов цветности.

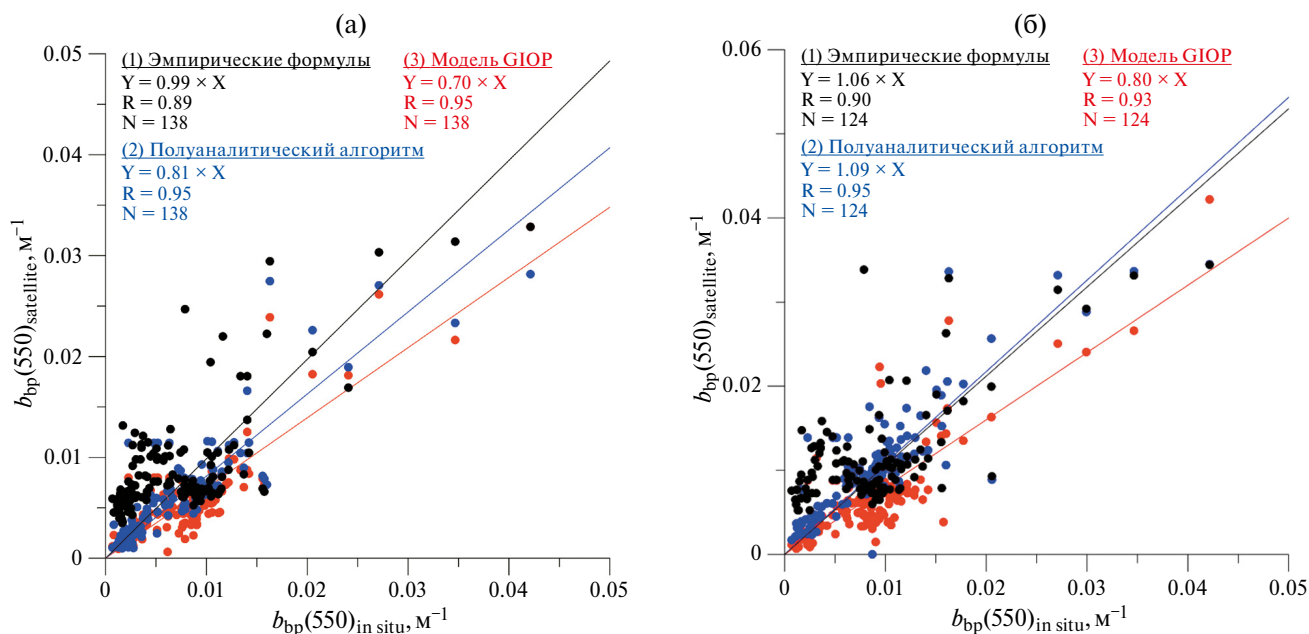


Рис. 6. Сравнение показателей рассеяния назад взвешенными частицами, рассчитанных по данным натурных измерений КЯ и по спутниковым данным R_{rs} тремя способами: а — по данным MODIS/Aqua, MODIS/Terra; б — по данным OLCI/Sentinel-3A, OLCI/Sentinel-3B.

показатели $b_{bp}(550)$: коэффициент корреляции $R = 0.95$ как для MODIS, так и для OLCI. Расчет по R_{rs} сканера OLCI дает в среднем незначительно завышенные величины относительно расчета по R_{rs} сканера MODIS. Черным цветом отмечены показатели, рассчитанные по эмпирическим формулам для угла цветности (3). Коэффициенты корреляции $R = 0.89$ для MODIS и $R = 0.90$ для OLCI. Разброс значений больше, чем для других методов, однако в среднем эмпирические формулы практически не завышают и не занижают результаты, коэффициент в уравнении регрессии

близок к 1. Модель GIOP дает наименьший разброс, однако существенно занижает результаты. Тем не менее, для качественной оценки рассеяния назад ее использование в данном случае возможно.

Сопоставление поглощения POB, рассчитанного разными способами (рис. 7), показывает, в первую очередь, что расчет по модели GIOP (3) с использованием данных как MODIS, так и OLCI существенно завышает результаты. При этом отдельные выбросы появляются как для спектров КЯ, полученных в более мутных водах

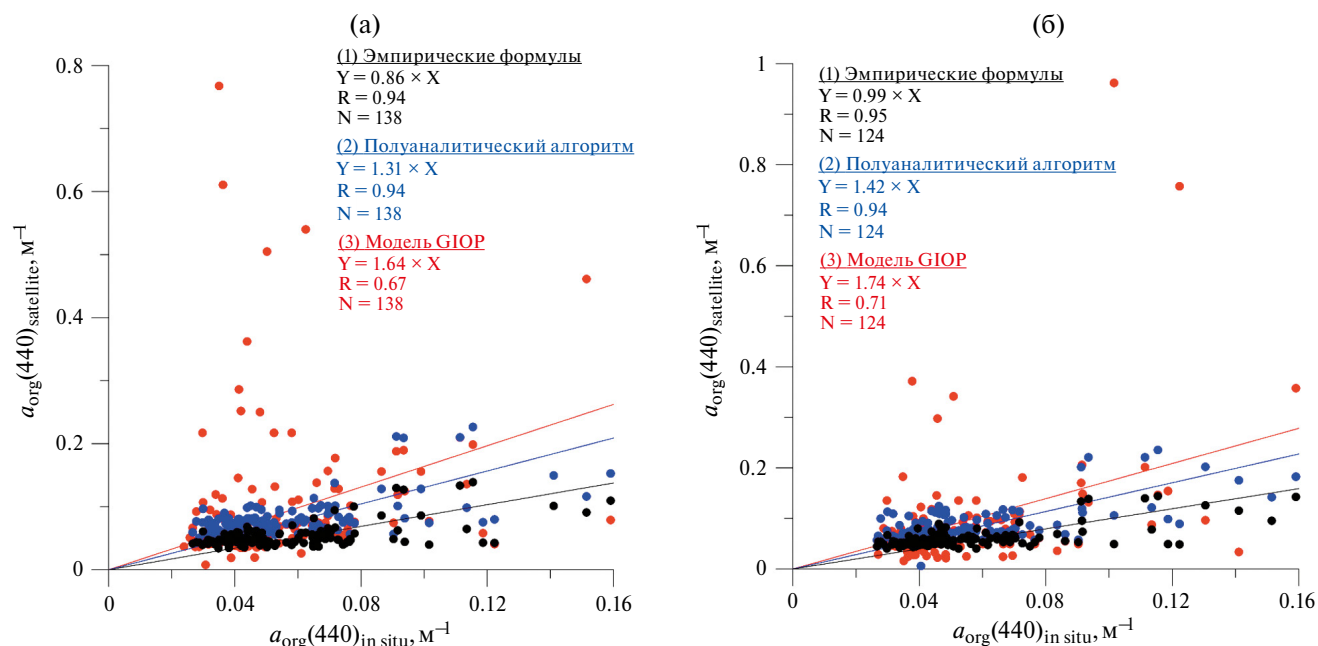


Рис. 7. Сравнение показателей поглощения растворенным органическим веществом, рассчитанных по данным натурных измерений КЯ и по спутниковым данным R_{rs} тремя способами: *a* – по данным MODIS/Aqua, MODIS/Terra; *б* – по данным OLCI/Sentinel-3A, OLCI/Sentinel-3B.

(подгруппы I и II по углу цветности), так и для нормальных условий (подгруппа III). Возможной причиной этого может служить неверная оценка характеристик поглощения атмосферным аэрозолем при атмосферной коррекции, которая приводит к искажению значений в коротковолновой части спектра R_{rs} , определяющей полученное значение поглощения РОВ [15]. В целом большой разброс не позволяет рассматривать модель GIOP для оценки поглощения РОВ, в отличие от рассеяния назад взвешенным веществом, для которого она дает хорошие результаты. Эмпирические формулы и полуаналитический алгоритм дают приблизительно одинаковую корреляцию результатов с данными *in situ*, при этом полуаналитический алгоритм завышает оценку до 30 и 40%, а эмпирические формулы занижают незначительно или оценивают практически верно в случае OLCI.

Приведенная в нашей работе, по сути, модельная симуляция $b_{\text{bp}}(550)$ и $a_{\text{org}}(440)$ показывает продуктивность разделения спектров R_{rs} на подгруппы для вод, которые явно различаются по своим оптическим свойствам. Выделение подгрупп по углу цветности позволяет при переходе к данным Level 3 использовать подходящий для данного типа вод алгоритм или эмпирические соотношения. По нашему мнению, это помогло бы в дальнейшем развитию различных методов, основанных на классификации. Так, можно

определить подгруппы со значениями угла цветности, аномальными для данного водоема, как, например, показано в работе [21]. Появление повышенных значений РОВ (т.е. низких значений угла цветности) в районах, для которых это нехарактерно, может использоваться, например, как маркер несанкционированных сбросов сточных (льальных) вод и т. п.

Цвет воды, а значит, и угол цветности определяется формой спектра КЯ. Значительное изменение формы, как, например, при переходе от вод Черного моря к водам Азовского, приводит к нарушению корреляций между спектральными отношениями и ПГХ. На примере с поглощением РОВ видно, что, если для спектров R_{rs} с неправильной атмосферной коррекцией не использовать модель GIOP, можно значительно улучшить восстановление первичных гидрооптических характеристик. В то же время полуаналитический алгоритм (2), во-первых, позволяет дополнительно скорректировать спектры R_{rs} для устранения возможных искажений, а во-вторых, обладает возможностью автоматического выбора спектральных участков для расчета неизвестных параметров, в данном случае $b_{\text{bp}}(550)$ и $a_{\text{org}}(440)$, в зависимости от того, в каком диапазоне они оказывают наибольшее влияние на КЯ.

Следует также отметить, что, хотя данные, на которых получены эмпирические формулы, не включали диапазон углов менее 150° , результаты

показывают их применимость и для спектров подгруппы I с углами цветности менее 100°.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе объединены различные подходы к исследованию цвета моря, существовавшие длительное время. Достаточно большой объем накопленных данных для Черного моря позволил получить и в дальнейшем использовать ортогональные функции для восстановления полного спектра КЯ по спутниковым измерениям в дискретных оптических каналах.

Угол цветности оказался той характеристикой, которая хорошо восстанавливается по спутниковым данным, не требуя внесения поправок. Несмотря на некоторую громоздкость вычислений, он представляет собой удобный параметр классификации спектров КЯ. Так, для района исследований в Черном и Азовском морях предложено разделение на три подгруппы спектров для вод, различающихся по своим оптическим свойствам, а, следовательно, и по составу примесей.

При сравнении эмпирических и полуаналитических методов восстановления ПГХ морской воды показано, что независимо от метода показатель рассеяния назад взвешенным веществом восстанавливается по спутниковым данным R_{rs} с хорошей точностью. Любой из приведенных методов можно использовать для качественной и, с некоторой поправкой, для количественной оценки рассеяния назад.

В случае расчета поглощения растворенным органическим веществом здесь большую роль играет качество спутниковых данных Level 2. Это позволяет подчеркнуть преимущество комплексного подхода, сочетающего ортогональные функции, рассчитанные на массиве длительных натурных наблюдений, и колориметрические расчеты, для которых не столь важны точные значения КЯ. Величины угла цветности сильно коррелируют с поглощением РОВ, поэтому использование полученных эмпирических соотношений в большинстве случаев оказывается предпочтительнее, чем другие рассмотренные методы, и дает хорошие результаты.

Финансирование работы. Работа выполнена в рамках государственного задания Морского гидрофизического института Российской академии наук по темам FNNN-2024–0012 “Оперативная океанология” и № FNNN-2024–0016 “Прибрежные исследования”, данные получены в 106, 110, 116, 117, 119, 126 и 127 рейсах НИС “Профессор Водяницкий” (Центр коллективно-

го пользования “НИС Профессор Водяницкий” Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра “Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского Российской академии наук”).

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Копелевич О.В., Костяной А.Г.* Использование биооптических параметров океана, определяемых по спутниковым данным, в качестве основных климатических переменных // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2018. Т. 3. С. 8–29. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2018-3-8-29>. EDN: YNFLOP
2. *Корчемкина Е.Н.* Влияние дополнительной коррекции на соответствие данных дистанционного измерения коэффициента яркости 2-го уровня данным *in situ* для вод Черного моря // *Труды XII Всероссийской конференции с международным участием “Современные проблемы оптики естественных вод”*. М.: Издательство “ИО РАН”, 2023. С. 124–129. <https://doi.org/10.29006/978-5-6051054-4-2-2023>
3. *Корчемкина Е.Н., Маньковская Е.В.* Спектральный коэффициент яркости, цветовые характеристики и относительная прозрачность вод Черного моря весной 2019 и 2021 годов: сравнительная изменчивость и эмпирические связи // *Морской гидрофизический журнал*. 2024. Т. 40. № 1. С. 5–20. EDN: HMPHDG
4. *Ли М.Е., Мартынов О.В.* Измеритель коэффициента яркости для подспутниковых измерений биооптических параметров вод // *Экологическая безопасность прибрежных и шельфовых вод и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2000. № 1. С. 163–173. EDN: BELAJW
5. *Ли М.Е., Шибанов Е.Б., Корчемкина Е.Н., Мартынов О.В.* Определение концентрации примесей в морской воде по спектру яркости восходящего излучения // *Морской гидрофизический журнал*. 2015. № 6. С. 17–33. EDN: VHEWVT
6. *Маньковский В.И., Соловьев М.В., Маньковская Е.В.* Гидрооптические характеристики Черного моря. Справочник. Севастополь: МГИ НАН Украины. 2009. С. 40–41.
7. *Оптика океана: В 2-х т. / Отв. ред. А.С. Монин.* Москва: Наука, 1983. Т. 1. Физическая оптика океана. 371 с.; Т. 2. Прикладная оптика океана. 236 с.
8. *Algorithm Descriptions*. 2018. <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/atbd> (дата обращения 26.06.2024)
9. *Churilova T., Efimova T., Moiseeva N. et al.* Annual variability in light absorption by particles and colored dissolved organic matter in coastal waters of Crimea

- (the Black Sea) // Proceedings of SPIE. Irkutsk: SPIE, 2017. V. 10466: 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 104664B.
<https://doi.org/10.1117/12.2288339>
10. Churilova T., Suslin V., Krivenko O. et al. Light absorption by phytoplankton in the upper mixed layer of the Black Sea: Seasonality and parametrization // Frontiers in Marine Science. 2017. V. 4. 90.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00090>
 11. Korchemkina E.N., Kalinskaya D.V. Algorithm of additional correction of Level 2 remote sensing reflectance data using modelling of the optical properties of the Black Sea waters // Remote Sensing. 2022. V. 14. № 4.
<https://doi.org/10.3390/rs14040831>
 12. Lee M.E., Shybanov E.B., Korchemkina E.N., Martynov O.V. Retrieval of concentrations of seawater natural components from reflectance spectrum // Proceedings of SPIE 22nd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, Tomsk, Russia, 29 November 2016 (100352Y).
<https://doi.org/10.1117/12.2247845>
 13. Morel A. Optical properties of pure water and pure sea water // Optical Aspects of Oceanography / Edited by N.G. Jerlov, E.S. Nielson. New York: Academic Press, 1974. P. 1–24.
 14. Ocean Color Web. <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения 26.06.2024)
 15. Shybanov E., Papkova A., Korchemkina E., Suslin V. Blue Color Indices as a Reference for Remote Sensing of Black Sea Water // Remote Sens. 2023. V. 15. 3658.
<https://doi.org/10.3390/rs15143658>
 16. Smith R.C., Baker K.S. Optical properties of the clearest natural waters (200–800 nm) // Applied Optics. 1981. V. 20. Iss. 2. P. 177–184.
<https://doi.org/10.1364/AO.20.000177>
 17. Smith T., Guild J. The C.I.E. colorimetric standards and their use // Transactions of the Optical Society. 1931. V. 33. Iss. 3. P. 73–134.
<https://doi.org/10.1088/1475-4878/33/3/301>
 18. Van der Woerd H.J., Wernand M.R. True colour classification of natural waters with medium-spectral resolution satellites: SeaWiFS, MODIS, MERIS and OLCI // Sensors. 2015. V. 15. Iss. 10. P. 25663–25680.
<https://doi.org/10.3390/s151025663>
 19. Werdell P.J., Franz B.A., Bailey S.W. et al. Generalized ocean color inversion model for retrieving marine inherent optical properties // Applied Optics. 2013. V. 52. Iss. 10. P. 2019–2037.
<https://doi.org/10.1364/AO.52.002019>
 20. Werdell J., Mckinna L., Boss E. et al. An overview of approaches and challenges for retrieving marine inherent optical properties from ocean color remote sensing // Progress in Oceanography. 2018. V. 160. P. 186–212.
<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.01.001>
 21. Zhao Y., Shen Q., Wang Q. et al. Recognition of water colour anomaly by using Hue Angle and Sentinel 2 image // Remote Sensing. 2020. V. 12(4). 716.
<https://doi.org/10.3390/rs12040716>

CALCULATION OF HUE ANGLE AND INHERENT OPTICAL PROPERTIES OF BLACK SEA AND SEA OF AZOV WATER BASED ON SATELLITE COLOR SCANNERS DATA

E. N. Korchemkina*, E. V. Mankovskaya

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

*e-mail: korchemkina@mhi-ras.ru

The study calculates the hue angles of the Black Sea and Sea of Azov water based on satellite and in situ measurements of the reflectance coefficient for 2019–2023. The correlation coefficient for the satellite and in situ hue angles is 0.92. Division of the reflectance spectra into subgroups according to the values of the hue angle is proposed for the study area. Satellite-derived values of absorption by dissolved organic matter (including detritus absorption) and backscattering by suspended particles have been compared in three ways: by empirical formulas for the hue angle, by a semianalytical algorithm for the spectral reflectance coefficient, and by the standard satellite algorithm (GIOP model). The empirical relationship is better at retrieving the absorption by dissolved organic matter than the standard satellite or semianalytical algorithms whereas for backscattering by suspended particles all three methods show similar quality of retrieving.

Keywords: hue angle, sea reflectance coefficient, ocean color, absorption by dissolved organic matter, backscattering by suspended particles