Особенности работы алгоритмов атмосферной коррекции Ocean Color при расчёте спектрального коэффициента яркости моря для различных состояний атмосферы

Е. Б. Шибанов, А. С. Папкова

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия
E-mail: hanna.papkova@gmail.com

Работа посвящена оценке спектрального хода ошибки атмосферной коррекции спутниковых измерений коэффициента яркости моря при различных состояниях атмосферы. При валидации данных был отмечен ряд систематических ошибок стандартных алгоритмов, например отрицательные значения спутниковых коэффициентов яркости в коротковолновой области на 412 и 443 нм при наличии пыли в атмосфере. Показано, что современный подход определения аэрозольного рассеяния света в коротковолновой части видимого диапазона методом экстраполяции сигнала из ближней ИК-области имеет недостатки. Аналогичные решения методом интерполяции имеют более точные оценки. В работе показано, что в присутствии поглощающего аэрозоля спектральный закон ошибок атмосферной коррекции близок к функции λ^{-4}. Этот эффект объясняется тем, что методами дистанционного зондирования по алгоритмам Гордона и Ванга пылевой аэрозоль определяется по инфракрасному каналу, однако основное влияние аридный аэрозоль оказывает на соотношение аэрозольного и молекулярного компонентов. В работе представлены тренды для дальнейшей интерполяции спутниковых данных не только при условии чистой атмосферы, но и в случаях присутствия поглощающего аэрозоля. Получены экспериментальные закономерности ошибки валидации для сенсора MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) спутника Aqua.

Ключевые слова: атмосферная коррекция, спектральный коэффициент яркости, пылевой аэрозоль, нормализованная яркость моря, аэрозольная оптическая толщина, MODIS Aqua, AERONET

Одобрена к печати: 03.11.2022
DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-9-17

Введение

Информация о биооптических характеристиках морской воды содержится в величинах и в спектральной структуре яркости вышедшего из водной толщи излучения $L_w(\lambda)$, определяющейся оптическими свойствами морской воды, которые, в свою очередь, зависят от количественного и качественного состава взвешенных и растворённых в ней веществ (Копелевич и др., 2015). Спутниковые сканеры цвета, например MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Aqua, измеряют спектральные величины яркости восходящего излучения на верхней границе атмосферы (L_{TOA}) (*англ.* Top of Atmosphere Radiance), которая дополнительно включает в себя рассеянное аэрозольными частицами и молекулами воздуха излучение, а также излучение, отражённое поверхностью воды $L_w(\lambda)$. Таким образом, для расчёта $L_w(\lambda)$ необходима процедура «атмосферной коррекции», исключающая вклад этих составляющих в величину L_{TOA}. Трудность решения задачи атмосферной коррекции определяется, прежде всего, тем, что даже в открытой части Мирового океана, воды которой характеризуются насыщенным синим цветом, L_w в «синей» части спектра составляет всего около 10–15 % от общей яркости, а преобладает рассеянное атмосферой излучение. В прибрежных районах в «синей» области спектра вклад L_w в яркость на верхней границе атмосферы становится меньшим (5 %) из-за роста поглощения примесями, содержащимися в морской воде, а также вследствие увеличения изменчивости аэрозольного рассеяния.

При валидации спутниковых данных был отмечен ряд систематических ошибок стандартных алгоритмов, построенных на принципе экстраполяции свойств аэрозоля и ближней

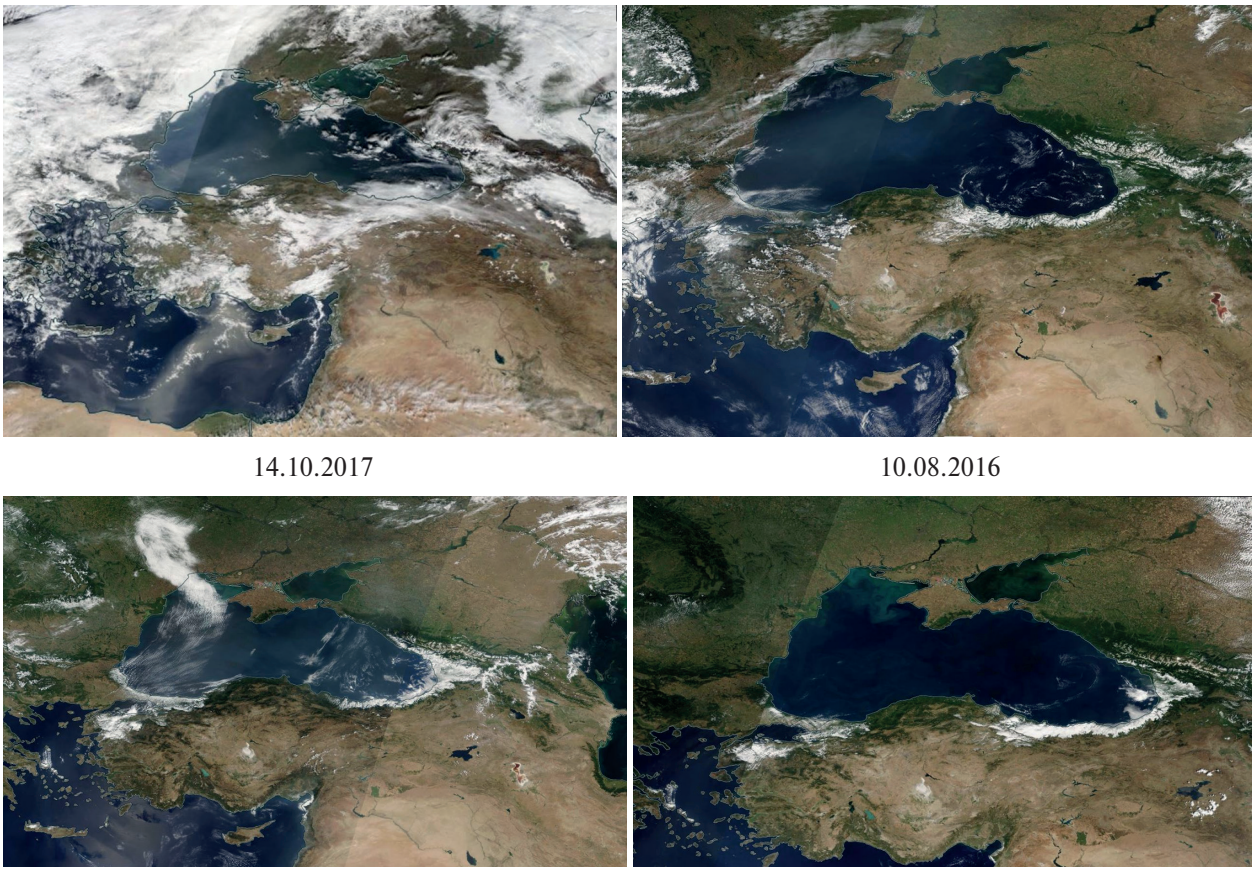
инфракрасной (ИК) области спектра в видимую его часть (Gordon, 1989). Эти ошибки в основном вызваны следующими причинами: неопределённостью в оценках значений яркости моря во всём видимом диапазоне из-за бимодального распределения аэрозольных частиц по размеру, пространственной неоднородностью атмосферы (границы облаков), наличием поглощающего аэрозоля (пыль, смог) (Суетин, Королев, 2021; Moulin et al., 2001). В случае слабой изменчивости коэффициента яркости моря в коротковолновой области по сравнению с изменчивостью атмосферной помехи, что справедливо для вод Чёрного моря, эту область можно использовать для контроля свойств аэрозольного рассеяния, т. е. применить метод интерполяции из «синей» и ближней ИК-областей спектра в видимый диапазон (Паршиков, 1992). Как было показано ранее в работе (Корчемкина и др., 2009), данные Level-2 для Чёрного моря требуют проведения дополнительной коррекции, основанной на методе интерполяции. Погрешность атмосферной коррекции, т. е. функция интерполяции, описывалась законом $C_1 + C_2/\lambda^2$, где константы находятся по предполагаемым значениям коэффициента яркости моря на границах видимого диапазона. Поглощающий аэрозоль должен существенно повлиять на вид интерполяционной формулы, поскольку поглощается не только аэрозольная компонента рассеяния, которую можно попытаться описать моделью, но и молекулярное рассеяние. В случае пылевых выносов средняя высота расположения поглощающих частиц заметно больше, чем у аэрозолей промышленного и континентального типа. Поэтому сильнее должно быть влияние поглощения на величину радиации, рассеянной назад. В настоящей работе проводится экспериментальная оценка ошибок стандартной атмосферной коррекции на основе сопоставления спутниковых данных с данными, полученными с уровня поверхности моря. Рассматриваются случаи: чистой атмосферы, слабой облачности, повышенных значений аэрозольной оптической толщины (АОТ) и выносов пыли.

Инструменты и методы

В настоящем исследовании для нахождения влияния различных атмосферных условий на изменчивость спектрального коэффициента яркости выбираются данные, представляемые архивом данных SeaBASS (*англ.* SeaWiFS Bio-optical Archive and Storage System) для MODIS спутника Aqua и трёх станций AERONET (*англ.* AErosol RObotic NETwork) (Werdell, Bailey, 2002). Спутник Aqua (EOS-PM, *англ.* Earth Observing System; PM — восходящий узел в 13:30 PM) имеет солнечно-синхронные полярные орбиты (высота — 705 км, период обращения — 99 мин, наклонение — 98,2°) и пересекает экватор, двигаясь с юга на север в 13:30 по местному времени. Спектрорадиометр MODIS — ключевой прибор на борту спутника Aqua. В настоящей работе использовались данные MODIS, полученные на восьми каналах (412 нм, 443, 469, 488, 531, 547, 555, 667 нм). В качестве натурных данных используются результаты измерений двух прибрежных станций AERONET на западе Чёрного моря: Galata_Platform (43,045° с. ш., 28,193° в. д.) в Болгарии и Gloria (44,6° с. ш., 29,36° в. д.) в Румынии — и со станции Venise (45,31° с. ш., 12,508° в. д.), расположенной у берегов Италии (Средиземное море). Сеть AERONET, разработанная для проведения исследований атмосферы в различных масштабах с использованием распределённых по всему миру автономных солнечных фотометров Cemel-318, была расширена для поддержки морских приложений. Этот новый сетевой компонент под названием AERONET – Ocean Color (AERONET-OC) обеспечивает дополнительную возможность измерения коэффициента яркости моря. AERONET-OC играет важную роль в спутниковой деятельности по проверке цвета океана за счёт стандартизированных измерений. Более подробную информацию о сети AERONET и её приложении Ocean Color можно найти в работе (Zibordi et al., 2009). Для дополнительной информации о поглощающей природе аэрозоля именно пустынного происхождения анализировались 7-дневные обратные траектории движения аэрозолей, предназначенные для поддержки программы AERONET и проекта BAMGOMAS (от *англ.* Back trajectories (обратные траектории), AERONET, MODIS, GOCART (*англ.* Gauging ocean Organic Carbon), MPLNET (*англ.* Micro-Pulse Lidar NETwork) Aerosol Synergism) (Schoeberl, Newman, 2005).

Основные результаты и обсуждения

В настоящем исследовании рассматривались особенности работы алгоритмов атмосферной коррекции при различных внешних условиях, таких как: наличие пылевого аэрозоля, дымки неявного происхождения (смог, туман и т. д.), границ облачности. Исходными данными служили данные валидации коэффициентов $R_{rs}(\lambda)$ из архива SeaBASS для трёх точек: двух станций AERONET в Чёрном море и станции Venise в Средиземном море. Точка в Средиземном море была добавлена в анализ данных, так как при пылевых переносах со стороны Сахары траектория движения пылевого аэрозоля к Чёрному морю в большинстве случаев пересекает воды Средиземного моря. Все отобранные даты были отсортированы на четыре группы для каждого моря (Чёрное и Средиземное): пыль, дымка, границы облаков, чистая атмосфера. Для каждого значения результатов валидации данных AERONET спутниковыми значениями был проведён визуальных анализ конкретных спутниковых снимков. При наличии видимого шлейфа жёлтого, бело-жёлтого, белого оттенка делалось предположение о присутствии пыли. Если снимок был мутным, с явной белой дымкой, делалось предположение о возможном присутствии дымки. При наличии близкой облачности, границ облаков в исследуемом пикселе делалось предположение о присутствии границ облачности. Чистая атмосфера характеризовалась визуально чистым, чётким снимком без облаков (*рис. 1*).



14.10.2017 10.08.2016

09.08.2017 01.08.2017

Рис. 1. Примеры спутниковых снимков пыли, дымки, облачности и чистой атмосферы по данным Ocean Color MODIS Aqua

По натурным данным AERONET для каждого измерения был проведён дополнительный анализ, а именно: оценка величины аэрозольной оптической толщины (AOT), величины параметра Ангстрема (AE), величины альбедо однократного рассеяния (*англ.* Single-scattering albedo — SSA). Пылевой перенос в отобранные даты должен подтверждаться не только визуально,

но и высокими показателями АОТ и более низкими, чем для чистой атмосферы, ангстремами. Напротив, в дни с чистой атмосферой АОТ должен быть минимальным, а АЕ — максимальным. При наличии поглощающего аэрозоля регистрируется занижение значений SSA. В спорных ситуациях при определении пыли, дымки или края облаков был проведён анализ обратных 7-дневных траекторий, подтверждающий или опровергающий пылевое происхождение аэрозольной дымки над исследуемыми пикселями.

Стоит отметить, что для Чёрного моря характерным является движение пылевого аэрозоля со стороны Сахары, а также со стороны Аравийского п-ова (Papkova et al., 2021). Всего для станций Gloria, Galata_Platform и Venise в базе SeaBASS внесено по данным MODIS Aqua 4580 значений (с 2006 по 2017 г.). Следующим шагом стала дополнительная проверка достоверности натурных измерений яркости моря системой AERONET. При измерении коэффициента яркости из-за поверхностного волнения, нестабильности и неоднородности атмосферы может происходить выброс данных по нескольким каналам измерений. Считалось, что пропуски каналов — признак плохого качества данных. Без пропусков по спектральным каналам для трёх станций осталось 953 значения, а после удаления дубликатов (измерений, близких по времени) осталось 838 точек. Применялся также дополнительный критерий — близость экспериментальных данных к модельному спектру коэффициента яркости моря. Его выражение лучше всего записывать в виде:

$$\rho(\lambda) = \frac{kb_b}{a(\lambda)}. \qquad (1)$$

Обратное рассеяние, в свою очередь, может быть описано формулой (Morel, 1973):

$$b_b(\lambda) = b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda_0)\frac{\lambda_0}{\lambda}.$$

Поглощение записывалось в виде суммы трёх слагаемых с двумя неизвестными (Smith, 1981):

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + C_{chl}a^*_{ph}(\lambda) + C_{ddm}\mathrm{e}^{-0{,}015(\lambda-\lambda_0)},$$

где C_{chl} — концентрация хлорофилла; C_{ddm} — концентрация органического вещества, детрит + жёлтое вещество; $a_w(\lambda)$ — показатель поглощения чистой воды; $a^*_{ph}(\lambda)$ — удельный показатель поглощения фитопланктона по модели, описанной в работе (Bricaud et al., 1995), при заданной концентрации хлорофилла $C_{\mathrm{chl}} = 0{,}75$ мг/м^3, соответствующий данным исследования (Чурилова, Берсенева, 2004). В прибрежной зоне рассеяние назад в основном определяется рассеянием на примесях, содержащихся в морской воде. Поэтому вследствие линейности уравнения (1) конкретный выбор коэффициента слабо повлияет на результат аппроксимации натурных данных. Использовалось значение $k = 0{,}15$. Задача решалась методом нелинейной оптимизации функционала:

$$f = \sum_{\lambda_i}\left[\rho_{\exp}(\lambda_i) - \rho_m(\lambda_i)\right]^2,$$

где $\rho_{exp}(\lambda_i)$, $\rho_m(\lambda_i)$ — экспериментальный и модельный коэффициенты яркости на длине волны λ_i. Таким образом, происходило вычисление невязки *in situ* значений R_{rs} и значений по модели. Далее по правилу $2\sigma/R_{rs\,\max}$, где среднеквадратичное отклонение вычислялась для значения невязки, были отсеяны значения, имеющие явные аномалии расхождений. Проводилась нормировка на максимум коэффициента яркости, так как величина рассеивания определяет коэффициент яркости в прибрежных водах и может сильно варьироваться. Значение в 2σ характеризует типичное значение невязки. Далее отсеивались все значения, имеющие величину невязки больше, чем допустимые значения оптимизированной невязки: для Чёрного моря — 0,0505, для Средиземного моря — 0,0449. Таким образом, из 838 точек натурные измерения согласуются с трёхпараметрической моделью в 659 случаях, т. е. произошёл отсев 21 % натурных значений. Пылевой перенос был зарегистрирован при 49 (Чёрное море) и 32 (Средиземное море) измерениях, дымке соответствовало 80 и 52 измерения соот-

ветственно, наличие близкой облачности фиксировалось в 70 измерениях (и для Чёрного, и для Средиземного моря), во всех остальных случаях наблюдалась чистая атмосфера. Было вычислено, что АОТ на длине волны 862 нм по результатам MODIS Aqua и AERONET коррелируют на 72 % для Чёрного моря и на 81 % — для Средиземного моря. Стоит отметить, что при наличии пылевого аэрозоля корреляция значений АОТ падает до 37 % для Чёрного моря и до 63 % — для Средиземного моря (систематическое занижение спутниковых АОТ, так как в большинстве рассматриваемых случаев разница $\mathrm{AOT}_{\mathrm{MODIS}} - \mathrm{AOT}_{\mathrm{AERONET}} < 0$). Для отобранных значений в зависимости от состояния атмосферы по натурным измерениям AERONET были рассчитаны средние для всех случаев показатели АОТ на разных длинах волн, а также средние показатели параметра АЕ. Было определено, что пылевой аэрозоль имеет самые высокие АОТ, превышающие более чем в два раза средние АОТ для чистой атмосферы. Причём для Средиземного моря АОТ для пылевых выносов несколько выше, так как географически станция Venise находится ближе к источнику пыли — Сахаре. Параметр АЕ в среднем уменьшается на 20–25 % при наличии пыли и дымки.

Ранее в задачах вариации спутниковых и натурных измерений производительность алгоритма часто оценивалась с использованием обычных метрик наименьших квадратов, в частности среднеквадратичной ошибки регрессии (*англ*. Root Mean Square Error — RMSE), коэффициента детерминации (R^2) и наклона регрессии. В данной работе предложен альтернативный математический анализ для оценки спектральных особенностей изменения $R_{rs}(\lambda)$ при различных внешних условиях, а именно метод главных компонент (*англ*. principal component analysis — PCA) для отобранных случаев пылевого переноса с оценкой вклада первого вектора. Для конкретной задачи в качестве условного математического ожидания была взята разница *in situ* значений для станций AERONET и соответствующих спутниковых значений по спутниковым наблюдениям MODIS Aqua. Первый собственный вектор описывает основную изменчивость восстановленного коэффициента яркости, обусловленную погрешностями процедуры атмосферной коррекции, а также изменением оптических свойств моря при переходе от прибрежной части Чёрного моря к центральной его части или в случае пространственной неоднородности яркости при цветении фитопланктона (Шибанов и др., 2022). Таким образом, были проанализированы характерные статистические тенденции изменений спутниковых $R_{rs}(\lambda)$ при аномальных условиях. Результаты ковариационного анализа валидации спутниковых и натурных измерений для Чёрного и Средиземного морей по измерениям MODIS Aqua представлены на *рис*. *2* (см. с. 14).

Из *рис*. *2а* и *б* следует, что наибольшая разница между спутниковыми и натурными измерениями присутствует в случае пылевого аэрозоля, так как средняя разница коэффициента яркости максимальна. В меньшей степени влияет наличие дымки. Также стоит отметить одинаковый порядок величин, систематичные ошибки в отклонениях и одинаковые тенденции спектрального хода для разных состояний атмосферы для измерений в случае Чёрного и Средиземного морей. По результатам PCA-анализа для Чёрного моря видно, что для случаев с чистой атмосферой в среднем были выявлены небольшие ошибки, но при аномальных условиях наблюдается явная систематика, а именно ход первого собственного вектора имеет вид степенной функции. На *рис*. *2в* и *г* виден спектральный ход разницы коэффициента яркости моря по первому собственному вектору. Спектральную зависимость ошибки атмосферной коррекции при изменении поглощающих свойств аэрозоля можно представить в виде (Шибанов и др., 2022):

$$\delta(\lambda) \approx \mathrm{A}(\lambda) \cdot \left[\rho_m(\lambda) - \rho_{\mathrm{m}}(870)\right],$$

где ρ_m — коэффициент яркости чисто молекулярной атмосферы, спектральный закон которого близок к функции λ^{-4}; $A(\lambda)$ — доля поглощённого света, зависящая от спектральной величины АОТ и альбедо однократного рассеяния. В случаях с чистой атмосферой при анализе первого собственного вектора были зафиксированы минимальные погрешности атмосферной коррекции, что объясняется отсутствием аридного аэрозоля. Как показывает *рис*. *2в*, максимум вектора приходится на зелёную часть видимого диапазона, что соответствует смещению максимума коэффициента яркости при изменении прозрачности воды.

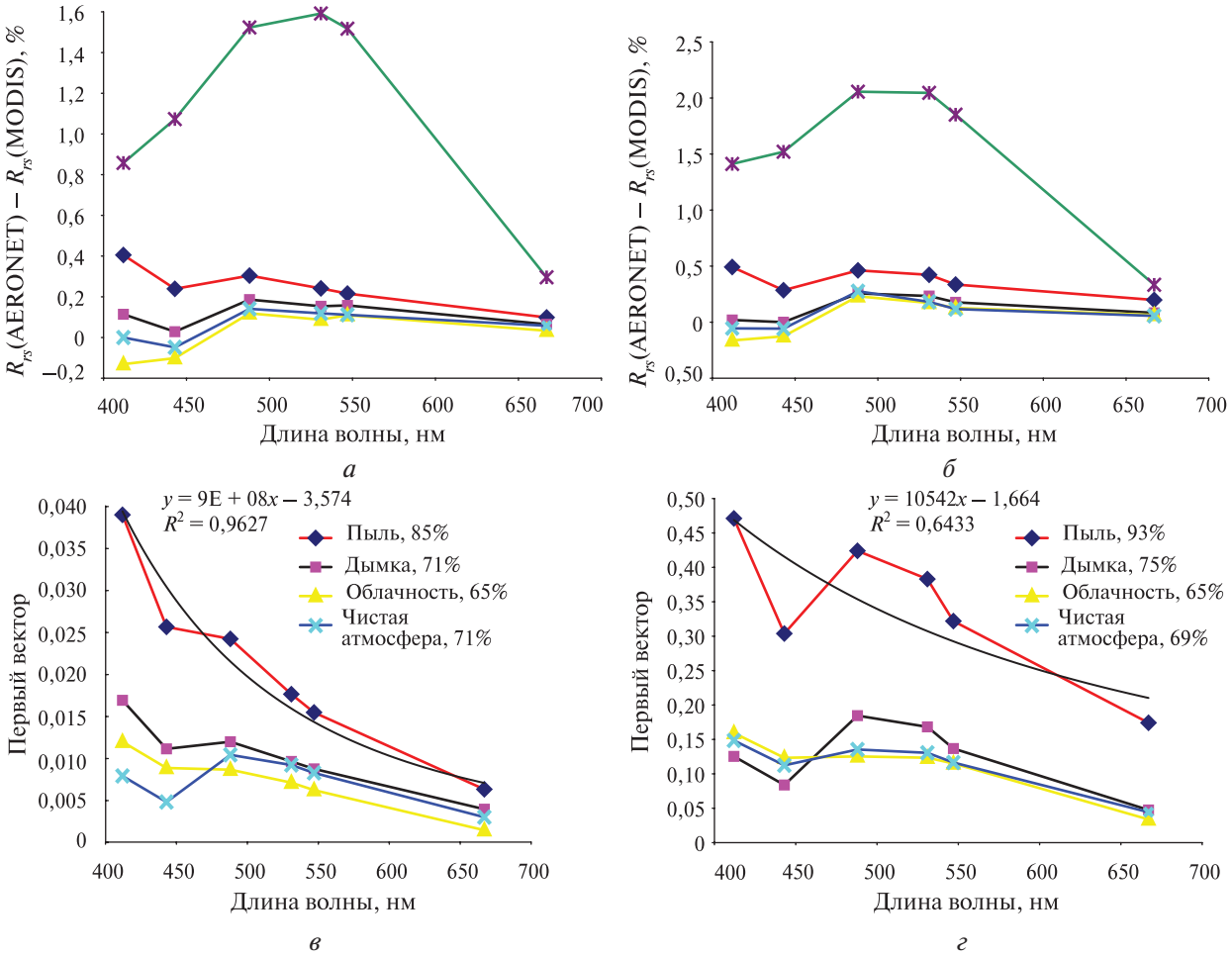


Рис. 2. Абсолютная погрешность R_{rs} между спутниковыми значениями MODIS Aqua и натурными измерениями AERONET для Чёрного (*а*) и Средиземного (*б*) морей; первый собственный вектор для Чёрного (*в*) и Средиземного (*г*) морей

Экспериментальные закономерности ошибки валидации MODIS Aqua

Статус	Чёрное море	R^2	Средиземное море	R^2
Пыль	$9E + 08\lambda^{-3,574}$	0,96	$1,05E + 04\lambda^{-1,66E}$	0,64
Дымка	$2E + 06\lambda^{-2,73}$	0,91	$7,16E + 02\lambda^{-1,40E}$	0,22
Границы облаков	$7E + 09\lambda^{-4,087}$	0,85	$4E + 06\lambda^{-2,821}$	0,74
Чистая атмосфера	$3,15E + 02\lambda^{-1,36E}$	0,24	$6,05E + 04\lambda^{-2,13E}$	0,66

Из *рис. 2* также видно, что в коротковолновой области изменчивость коэффициента яркости незначительна. Спектральный ход первого вектора в случаях наличия в атмосфере пылевых частиц или дымки неявного происхождения демонстрирует тенденцию к увеличению в коротковолновой области с промежуточным локальным максимумом около 500 нм и резким уменьшением значений в длинноволновой области спектра. Этот эффект объясняется тем, что методами дистанционного зондирования по алгоритмам Гордона и Ванга пылевой аэрозоль определяется по инфракрасному каналу, однако основное влияние аридный аэрозоль оказывает на соотношение аэрозольного и молекулярного компонентов (коротковолновая область спектра). На основании результатов *рис. 2в* и *г* было принято решение аппроксимировать первый собственный вектор для нахождения экспериментальных закономерностей ошибки валидации от длины волны при различных состояниях (пыль, дымка, границы облаков, чистая атмосфера) по данным MODIS Aqua (*таблица*).

Заключение

С использованием базы валидации данных Ocean Color – SeaBASS было проанализировано более чем 800 результатов спутниковых (MODIS Aqua) и *in situ* (AERONET) измерений в акватории Чёрного и Средиземного морей. Данные результаты в дальнейшем разбивались на четыре кластера (пыль, облачность, дымка, чистая атмосфера). Далее был использован метод главных компонент (PCA) для отобранных дат переносов с оценкой вклада первого вектора. В результате было найдено, что наибольшая разница между спутниковыми и натурными измерениями присутствует в случае пылевого аэрозоля, так как средняя разница коэффициента яркости максимальна. В меньшей степени влияет присутствие дымки. При наличии поглощающего аэрозоля наблюдается явная систематика, а ход первого собственного вектора имеет вид степенной функции. В присутствии поглощающего аэрозоля спектральный закон ошибок атмосферной коррекции близок к функции λ^{-4}. Математические оценки показывают, что погрешность экстраполяции величины аэрозольного рассеяния на длине волны λ (алгоритм Гордона и Ванга) при условии чистой атмосферы пропорциональна величине, являющейся полиномом второй степени от волнового числа $k = 2\pi/\lambda$. При условии пыли и границ облачности степень погрешности ошибки экстраполяции близка к λ^{-4}, при условии дымки — к λ^{-3}. Данное явление объясняется неточными оценками вклада крупнодисперсной фракции аэрозольных частиц в радиацию, рассеянную атмосферой.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (научный проект № 19-35-90066), а также в рамках темы государственного задания Морского гидрофизического института РАН (№ 0827-2021-0002, 0555-2021-0003 «Разработка методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с использованием данных дистанционных и контактных измерений»).

Литература

1. *Копелевич О. В.*, *Вазюля С. В.*, *Салинг И. В.*, *Шеберстов С. В.*, *Буренков В. И.* Электронный атлас «Биооптические характеристики морей России по данным спутниковых сканеров цвета 1998–2014 гг.» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 6. С. 99–110.
2. *Корчемкина Е. Н.*, *Шибанов Е. Б.*, *Ли М. Е.* Усовершенствование методики атмосферной коррекции для дистанционных исследований прибрежных вод Черного моря // Исслед. Земли из космоса. 2009. Т. 6. С. 24–30.
3. *Паршиков С. В.* Дистанционное зондирование оптически активных примесей с применением коротковолнового участка спектра // Автоматизированные системы контроля состояния морской среды: сб. науч. тр. 1992. С. 65–78.
4. *Суетин В. С.*, *Королев С.* Н. Использование спутниковых данных для определения характеристик поглощения света в водах Черного моря // Морской гидрофиз. журн. 2021. Т. 37. № 2. С. 222–232. DOI: 10.22449/0233-7584-2021-2-222-232.
5. *Чурилова Т. Я.*, *Берсенева Г. П.* Поглощение света фитопланктоном, детритом и растворенным органическим веществом в прибрежном районе Черного моря (июль – август 2002 г.) // Морской гидрофиз. журн. 2004. Т. 4. С. 39–50.
6. *Шибанов Е. Б.*, *Папкова А. С.*, *Калинская Д. В.* Особенности использования алгоритмов атмосферной коррекции для восстановления яркости Черного моря в дни пылевых переносов по спутниковым данным MODIS // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 7(402). С. 532–538. DOI: 10.15372/AOO20220703.
7. *Bricaud A.*, *Babin M.*, *Morel A.*, *Claustre H.* Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization // J. Geophysical Research. 1995. V. 100. P. 13321–13332. DOI: 10.1029/95JC00463.
8. *Gordon H. R.* Can the Lambert-Beer low be applied to the diffuse attenuation coefficient of ocean water // Limnology and Oceanography. 1989. V. 34. No. 8. P. 1389–1409. DOI: 10.4319/lo.1989.34.8.1389.
9. *Morel A.* Diffusion de la lumière par les eaux de mer: Résulats expérimentaux et approche théorique // AGARD. Lecture series. 1973. V. 61. P. 31.1–31.76.

10. *Moulin C.*, *Gordon H. R.*, *Banzon V. F.*, *Evans R. H.* Assessment of Saharan dust absorption in the visible from SeaWiFS imagery // J. Geophysical Research. 2001. V. 106D. P. 18239–18250. DOI: 10.1029/2000JD900812.
11. *Papkova A.*, *Papkov S.*, *Shukalo D.* Prediction of the Atmospheric Dustiness over the Black Sea Region Using the WRF-Chem Model // FLUIDS. 2021. V. 6. No. 6. Art. No. 201. DOI: 10.3390/fluids6060201.
12. *Schoeberl M. R.*, *Newman P.* A. A multiple-level trajectory analysis of vortex filaments // J. Geophysical Research. 1995. V. 25. P. 801–816. DOI: 10.1029/95JD02414.
13. *Smith R. C.* Optical properties of clearest natural waters (200–800 nm) // Applied Optics. 1981. V. 20. P. 177–184.
14. *Werdell P. J.*, *Bailey S. W.* The SeaWiFS Bio-Optical Archive and Storage System (SeaBASS): Current Architecture and Implementation. NASA/TM 2002–211617. Greenbelt, Maryland: Goddard Space Flight Center, 2002.
15. *Zibordi G.*, *Holben B.*, *Slutsker I.*, *Giles G.*, *D'Alimonte D.*, *Melin F.*, *Berthon J. F.*, *Vandemark D.*, *Feng H.*, *Schuster G.*, *Fabbri B. E.*, *Kaitala S.*, *Seppala J.* AERONET-OC: A Network for the Validation of Ocean Color Primary Products // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2009. V. 26. P. 1634–1651. DOI: 10.1175/2009JTECHO654.1.

Differences in the Ocean Color atmospheric correction algorithms for remote sensing reflectance retrievals for different atmospheric conditions

E. B. Shybanov, A. S. Papkova

Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia
E-mail: hanna.papkova@gmail.com

The work is devoted to estimating the spectral course of validation error of satellite and *in situ* measurements of remote sensing reflectance for various atmospheric conditions. During data validation, a number of systematic errors of standard algorithms were noted, for example, negative values of remote sensing reflectance in the short-wavelength region at 412 and 443 nm in the presence of dust in the atmosphere. It is shown that the modern approach to determining aerosol light scattering in the short-wavelength part of the visible range by extrapolating the signal from the near-IR region is not sufficiently correct from a physical point of view, and similar solutions by the interpolation method have more accurate estimates. The obtained results show that in the presence of an absorbing aerosol, the spectral law of atmospheric correction errors is close to the function λ^{-4}. This effect is explained by the fact that dust aerosol is determined by remote sensing methods using the Gordon and Wang algorithms using the infrared channel, but arid aerosol has the main effect on the ratio of the aerosol and molecular components (shortwave range). This paper presents trends for further interpolation of satellite data not only under the condition of a clean atmosphere, but also in the presence of an absorbing aerosol. Experimental patterns of validation error for MODIS Aqua have been obtained.

Keywords: atmospheric correction, remote sensing reflectance, dust aerosol, normalized water-leaving radiance, aerosol optical depth, MODIS Aqua, AERONET

Accepted: 03.11.2022
DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-9-17

References

1. Kopelevich O. V., Vazyulya S. V., Saling I. V., Sheberstov S. V., Burenkov V. I., Electronic atlas "Biooptical characteristics of the Russian Seas from satellite ocean color data of 1998–2014", *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 6, pp. 99–110 (in Russian).
2. Korchemkina E. N., Shybanov E. B., Lee M. E., Atmospheric Correction Improvement for the Remote Sensing of Black Sea Waters, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2009, Vol. 6, pp. 24–30 (in Russian).

3. Parshikov S. V., Remote sensing of optically active impurities using the short-wavelength part of the spectrum, *Avtomatizirovannye sistemy kontrolya sostoyaniya morskoi sredy*, 1992, pp. 65–78 (in Russian).
4. Suetin V. S., Korolev S. N., Application of Satellite Data for Retrieving the Light Absorption Characteristics in the Black Sea Waters, *Physical Oceanography*, 2021, Vol. 28, No. 2, pp. 205–214., DOI: 10.22449/1573-160X-2021-2-205-214.
5. Churilova T. Ya., Berseneva G. P., Absorption of light by phytoplankton, detritus, and dissolved organic substances in the coastal region of the Black Sea (July–August 2002), *Physical Oceanography*, 2004, Vol. 14, No. 4, pp. 221–233, DOI: 10.1007/s11110-004-0003-0.
6. Shybanov E. B., Papkova A. S., Kalinskaya D. V., Specifics of using atmospheric correction algorithms to determine the brightness of the black sea on days of dust transport from MODIS satellite data, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2022, Vol. 35, No. 7(402), pp. 532–538 (in Russian), DOI: 10.15372/AOO20220703.
7. Bricaud A., Babin M., Morel A., Claustre H., Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phyto-plankton: Analysis and parameterization, *J. Geophysical Research*, 1995, Vol. 100, pp. 13321–13332, DOI: 10.1029/95JC00463.
8. Gordon H. R., Can the Lambert-Beer low be applied to the diffuse attenuation coefficient of ocean water, *Limnology and Oceanography*, 1989, Vol. 34, No. 8, pp. 1389–1409, DOI: 10.4319/lo.1989.34.8.1389.
9. Morel A., Diffusion de la lumière par les eaux de mer: Résulats expérimentaux et approche théorique, *AGARD*, *Lecture series*, 1973, Vol. 61, pp. 31.1–31.76.
10. Moulin C., Gordon H. R., Banzon V. F., Evans R. H., Assessment of Saharan dust absorption in the visible from SeaWiFS imagery, *J. Geophysical Research*, 2001, Vol. 106D, pp. 18239–18250, DOI: 10.1029/2000JD900812.
11. Papkova A., Papkov S., Shukalo D., Prediction of the Atmospheric Dustiness over the Black Sea Region Using the WRF-Chem Model, *FLUIDS*, 2021, Vol. 6, No. 6, Art. No. 201, DOI: 10.3390/fluids6060201.
12. Schoeberl M. R., Newman P. A., A multiple-level trajectory analysis of vortex filaments, *J. Geophysical Research*, 1995, Vol. 25, pp. 801–816, DOI: : 10.1029/95JD02414.
13. Smith R. C., Optical properties of clearest natural waters (200–800 nm), *Applied Optics*, 1981, Vol. 20, pp. 177–184.
14. Werdell P. J., Bailey S. W., *The SeaWiFS Bio-Optical Archive and Storage System* (*SeaBASS*): *Current Architecture and Implementation*, NASA/TM 2002–211617, Greenbelt, Maryland: Goddard Space Flight Center, 2002.
15. Zibordi G., Holben B., Slutsker I., Giles G., D'Alimonte D., Melin F., Berthon J. F., Vandemark D., Feng H., Schuster G., Fabbri B. E., Kaitala S., Seppala J., AERONET-OC: A Network for the Validation of Ocean Color Primary Products, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, Vol. 26, pp. 1634–1651, DOI: 10.1175/2009JTECHO654.1.