

Влияние пылевого аэрозоля на результаты атмосферной коррекции спектрального коэффициента яркости Чёрного и Средиземного морей по спутниковым данным MODIS

А. С. Папкина, Е. Б. Шибанов

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

Одной из текущих проблем океанологии является задача валидации спутниковых и натурных данных спектрального коэффициента яркости, изучение влияния атмосферной составляющей на работу спутниковых алгоритмов. В данной работе рассматривается влияние пылевого аэрозоля на результаты расчёта спектрального коэффициента яркости Чёрного и Средиземного морей по измерениям спутника MODIS Aqua. Одиннадцать случаев переноса пыли сопровождались характерными изменениями оптических характеристик, таких как: аэрозольная оптическая толщина, распределение размеров частиц аэрозоля, параметр Ангстрема и альbedo однократного рассеивания. При анализе данных пылевых эпизодов, пять из которых были над акваторией Чёрного моря и шесть — Средиземного, сделан вывод о необходимости применения принципиально другого метода атмосферной коррекции, а для Чёрного моря — создания регионального алгоритма. Так, при наличии пылевого аэрозоля вследствие спектральных особенностей альbedo однократного рассеивания при высоких значениях оптической толщины аэрозоля спутниковые алгоритмы значительно завышали спектральный коэффициент яркости морской воды в длинноволновой области спектра. Для Средиземного моря подобный эффект наблюдался только в одном случае.

Ключевые слова: атмосферная коррекция, пылевой аэрозоль, спектральный коэффициент яркости, яркость моря, аэрозольная оптическая толщина, параметр Ангстрем, альbedo однократного рассеивания, MODIS, AERONET

Одобрена к печати: 01.12.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-46-56

Введение

При изучении влияния атмосферы на работу алгоритмов вычисления яркости моря важно правильно оценить вклад аэрозолей, поскольку они сильно изменчивы и могут значительно искажать результаты атмосферной коррекции. Оценка аэрозолей вычисляется по методологии, предложенной Г. Гордоном (*англ.* H. R. Gordon) и М. Вангом (*англ.* M. Wang), и с обновлёнными моделями аэрозолей и подходами к выбору этих моделей, подробно описанными в работах (Ahmad et al., 2010; Gordon, Wang, 1994). Этот алгоритм основан на наблюдениях датчиков из двух диапазонов в ближней инфракрасной (ИК) области (например, 748 и 869 нм для MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)), где вклады яркости моря обычно невелики и могут быть точно оценены с помощью итеративного подхода к биооптическому моделированию, как описано в работе (Bailey, Werdell, 2006). Полное описание алгоритма атмосферной коррекции, включая подробные сведения об оценке каждого компонента и операционном процессе, посредством которого оцениваются и удаляются вклады различных типов аэрозолей, доступны в публикации (Mobley et al., 2016). Следует отметить, что результаты спутниковых алгоритмов также регулярно калибруются с использованием новых подходов (Lee, Meister, 2017). Но несмотря на это, был отмечен ряд систематических ошибок стандартных алгоритмов, в основном вызванных следующими причинами:

1. Неопределённость в оценках значений яркости моря во всём видимом диапазоне из-за бимодального распределения аэрозольных частиц по размеру и вариации параметров распределения внутри каждой моды.
2. Пространственная неоднородность атмосферы (атмосферные фронты, границы облаков).
3. Поглощающий аэрозоль (пыль, смог) и его вертикальное распределение.

Значения $R_{rs}(\lambda)$ (спектральный коэффициент яркости, полученный методами дистанционного зондирования) являются основой спутниковых алгоритмов для оценки биооптического состояния моря. Цель данного исследования состоит в изучении влияния пылевого аэрозоля на ошибки восстановления спектральной отражательной способности морской воды и оптической толщины аэрозоля (*англ.* aerosol optical thickness — AOT) с помощью дистанционного зондирования (MODIS) и наземных измерений на основании данных AERONET. Поскольку главным объектом исследования выступает акватория Чёрного моря, изучение которой на протяжении десятилетий ведётся Морским гидрофизическим институтом РАН (МГИ РАН), можно считать, что оптические характеристики, их пространственная и сезонная изменчивость достаточно хорошо изучены. Дальнейшее сравнение значений $R_{rs}(\lambda)$, полученных методами дистанционного зондирования, с их типичными значениями будет служить критерием надёжности алгоритмов атмосферной коррекции (Корчемкина и др., 2009; Kalinskaya, Papkova, 2019; Suslin et al., 2016).

Ежегодно в период с марта по октябрь над Черноморским регионом фиксируется большое количество переносов пыли, в основном с юго-западного направления (пыль Сахары) (Папкина и др., 2020; Papkova et al., 2021). Известно, что частицы пылевого аэрозоля в атмосфере могут оказывать сильное влияние на изменение климата, качество воздуха и состояние экосистемы в целом. Извлечение оптических и физических характеристик пылевого аэрозоля методами дистанционного зондирования связано с рядом трудностей, поскольку частицы пыли имеют большую изменчивость в диапазоне размеров, форм, химического состава в зависимости от происхождения (региона), а также метеорологических условий. Как показали предыдущие отдельные тематические исследования, при наличии поглощения аэрозоля, такого как пыль, дым, или антропогенных загрязнённых частиц значения спутниковых измерений AOT искажаются, что приводит к аномалиям альбедо однократного рассеяния (*англ.* single-scattering albedo — SSA) и неправильной атмосферной коррекции (Kahn et al., 2016). Актуальность данной работы заключается в том, что некорректный учёт атмосферных воздействий (наличие пыли, продуктов сгорания биомассы, промышленных выбросов и т.д.) может исказить величины восстановленных значений $R_{rs}(\lambda)$ для вод Чёрного моря и впоследствии привести к большим ошибкам в расчётах концентрации хлорофилла (Suetin, Korolev, 2018). Для оценки влияния региональных особенностей на работу алгоритма NASA (*англ.* National Aeronautics and Space Administration, Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства) Ocean Color дополнительно рассматривались случаи пылевого переноса и в Средиземном море.

В статье анализируются характерные погрешности работы атмосферных алгоритмов в случае интенсивного присутствия пылевого аэрозоля. При этом яркость, измеряемая спутниковым датчиком, находится в диапазоне применимости работы алгоритмов.

Материалы и методы

Как отмечалось ранее, в настоящем исследовании будут использоваться данные, предоставленные спутником MODIS Aqua и сетью наземных фотометров AERONET. MODIS (или спектрорадиометр среднего разрешения) — ключевой прибор на борту спутников Terra (EOS AM) и Aqua (EOS PM) (*англ.* Earth Observing System; AM — нисходящий узел в 10:30 AM; PM — восходящий узел в 13:30 PM). Орбита Terra вокруг Земли рассчитана таким образом, что утром она проходит с севера на юг через экватор, а Aqua проходит через экватор с юга на север днём. Terra MODIS и Aqua MODIS просматривают всю поверхность Земли каждые два дня, собирая данные в 36 спектральных диапазонах (Bailey, Werdell, 2006). Эти данные улучшают понимание глобальной динамики и процессов, происходящих на суше, в океанах и нижних слоях атмосферы. MODIS играет жизненно важную роль в разработке проверенных глобальных интерактивных моделей системы Земли, способных достаточно точно предсказывать тенденции глобального изменения климата. С 2005 г. данные MODIS регулярно используются алгоритмами Ocean Color (Ahmad et al., 2010).

В качестве натуральных измерений для восстановления яркости морской воды (L_{wn}) и в последующем вычислений $R_{rs}(\lambda)$ будут использоваться результаты измерений фотометра CIMEL-318 для двух прибрежных станций AERONET, расположенных на западе Чёрного моря (Galata_Platform, Gloria (с 2019 г. — Section_7_Platform)). Также на основании ряда оптических параметров, предоставленных AERONET, таких как AOT, параметр Ангстрема (AE), распределения частиц аэрозоля по размерам, можно дополнительно подтвердить наличие Сахарской пыли над акваторией Чёрного моря. Более подробную информацию о сети AERONET и её приложении Ocean Color можно найти в работе (Zibordi et al., 2009). Для дополнительной информации о вертикальной стратификации атмосферного аэрозоля и траектории движения аэрозолей будут служить семидневные обратные траектории, предоставляемые AERONET BAMGOMAS, а также спутниковые данные CALIPSO соответственно (Omar et al., 2009; Schoeberl, Newman, 1995).

Результаты и обсуждения

В настоящем исследовании было выбрано несколько случаев пылевых переносов, подтверждённых не только визуализацией MODIS, но также натурными данными платформ AERONET, спутниковыми данными CALIPSO и обратными траекториями. Данный анализ проводился для дат переноса по Чёрному и Средиземному морям, преимущественно в дни без цветений моря (осенний период), а также при условии отсутствия облачности. В ходе работы не обрабатывались снимки, когда наблюдался эффект засветки от прямого солнечного света, отражённого взволнованной поверхностью моря. Ранее было доказано, что засветка в значительной степени искажает не только спутниковые, но и натурные измерения AERONET (погрешность 15 %) в измерениях AOT (Shi, Nakajima, 2018).

Всего было отобрано 11 дат: 13.10.2009, 12.09.2017, 16.10.2018, 27.09.2020 и 07.04.2021 — для Чёрного моря, 01.04.2013, 10.09.2015, 08.10.2016, 11.09.2017, 27.03.2018 и 05.10.2020 — для Средиземного моря. С использованием натуральных измерений Cimel-312 были проанализированы среднедневные показатели AOT во время пылевых переносов по сравнению со среднемесячными. Таким образом, было установлено, что за анализируемые даты показатели AOT для акваторий Чёрного и Средиземного морей более чем в 1,5 раза превышают среднемесячные значения. Также на наличие пыли указывают отклонения значений параметра Ангстрема (Stefan et al., 2020) (таблица).

Измерения AOT для станций AERONET в дни пылевых переносов и их среднемесячные значения

	Дата	Станция AERONET	AOT _{500–560}	AOT _{500–560} (мес)	AOT ₈₆₅	AOT ₈₆₅ (мес)	AE _{440–870}	AE _{440–870} (мес)
Чёрное море	12.09.2017	Gloria	0,28	0,15	0,22	0,08	0,95	1,13
	16.10.2018	Gloria	0,25	0,15	0,19	0,09	0,63	1,14
Средиземное море	10.09.2015	AgiaMarina	0,61	0,26	0,59	0,21	0,06	0,63
	08.10.2016	Forth_Crete	0,41	0,18	0,38	0,14	0,29	0,79
	27.03.2018	Finokalia	0,58	0,30	0,62	0,31	–0,03	0,70
	05.10.2020	Finokalia	0,33	0,21	0,29	0,15	0,22	0,71

Из дат переноса пыли две даты имеют совпадение по натурным измерениям AERONET для восстановленной яркости морской воды (L_{wn}). Пылевые переносы достаточно просто идентифицировать с использованием спутниковых кадров, чаще всего видно жёлтые облака или потоки, характерные только для пыли (рис. 1, см. с. 49).

Для каждого случая индивидуально рассмотрена область загрязнения пылевым аэрозолем. В среде Python была написана программа, позволяющая рассматривать изменчивость

средних значений коэффициентов $R_{rs}(\lambda)$ с учётом вариативности АОТ (средних по значениям АОТ в интервале) на 10 каналах (412 нм, 443, 469, 488, 531, 547, 555, 645, 667, 678 нм) по аналогии с работой (Shi, Nakajima, 2018). Таким образом, решалась обратная задача с фиксированными (принудительно задаваемыми) значениями АОТ (с шагом 0,05), где входными данными программы выступали измеренные значения яркости. Подробнее вариации интервалов АОТ в зависимости от присутствия различных типов поглощающих аэрозолей описаны в работе (Anderson et al., 2012).

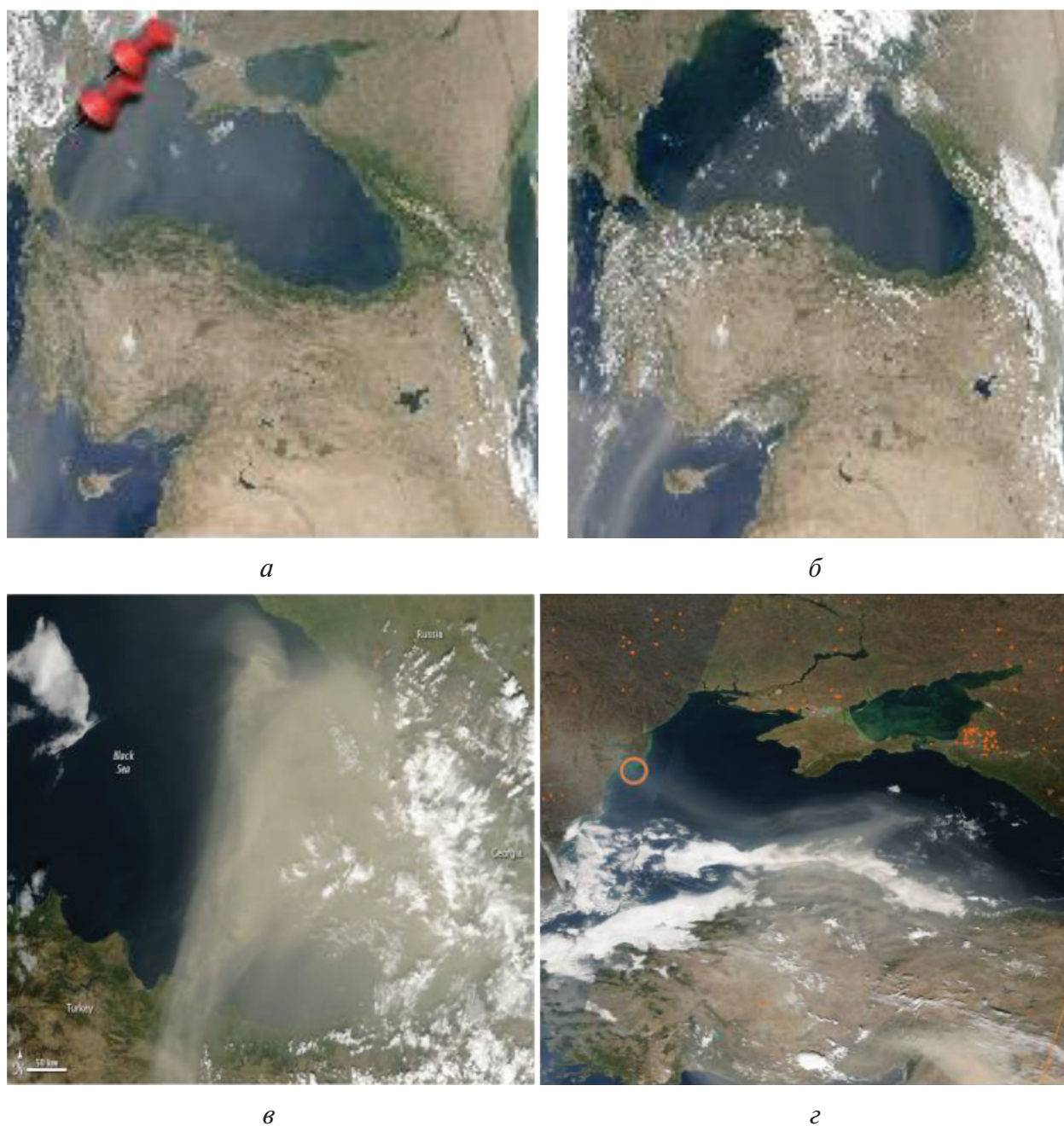


Рис. 1. Спутниковые снимки с платформ MODIS Aqua/Terra в дни пылевых переносов:
а — 12.09.2017; б — 27.09.2020; в — 13.10.2009; г — 16.10.2018

При анализе распределения усреднённых значений $R_{rs}(\lambda)$ была обнаружена тенденция к резкому увеличению значений $R_{rs}(\lambda)$ Чёрного моря одновременно во всей видимой области в случае максимальных АОТ (рис. 2, см. с. 50).

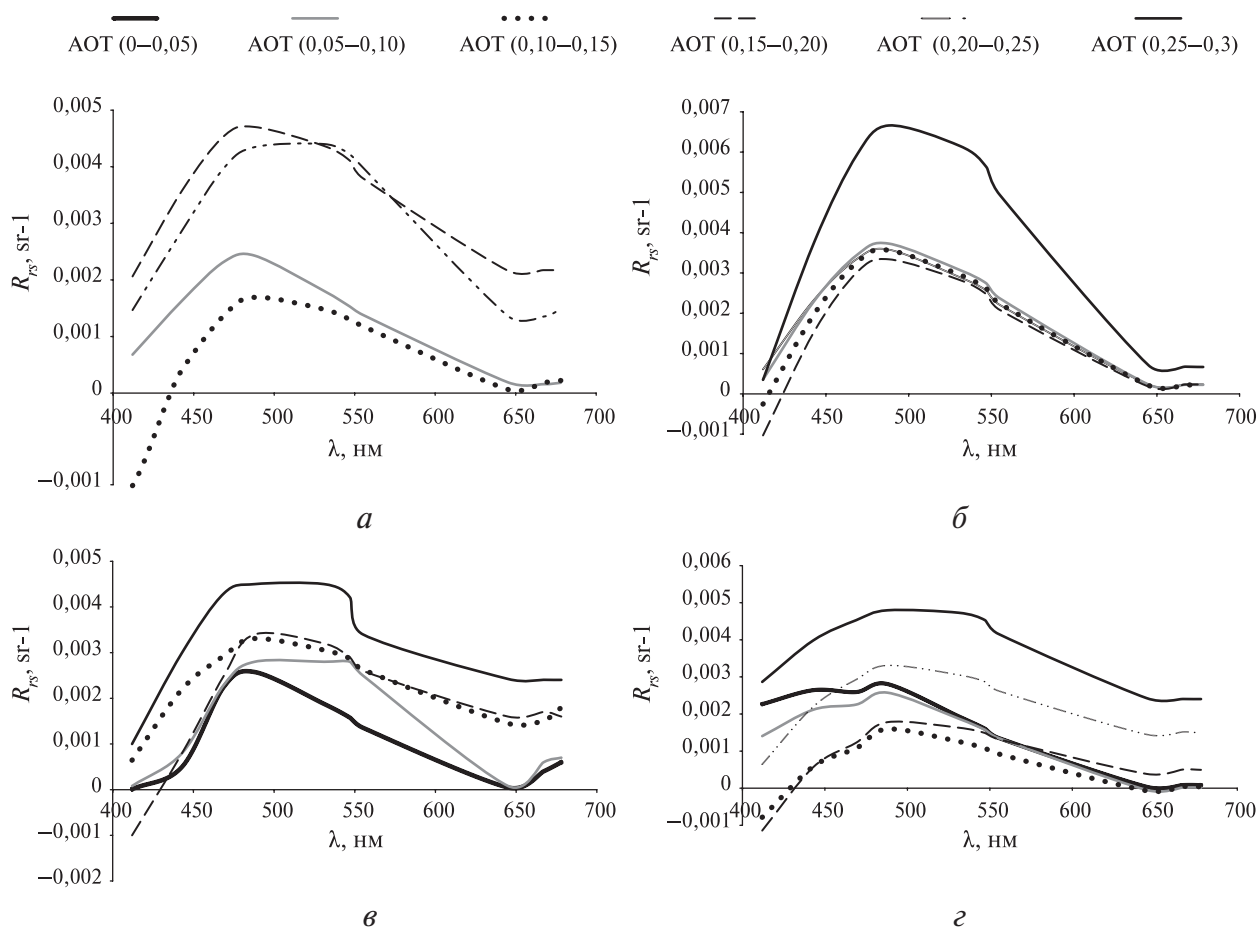


Рис. 2. Спектральные кривые средних по значениям AOT в интервале значений $R_{rs}(\lambda)$ для Чёрного моря (MODIS Aqua) на 10 каналах длин волн при изменении AOT: *a* — 13.10.2009; *б* — 12.09.2017; *в* — 16.10.2018; *г* — 27.09.2020

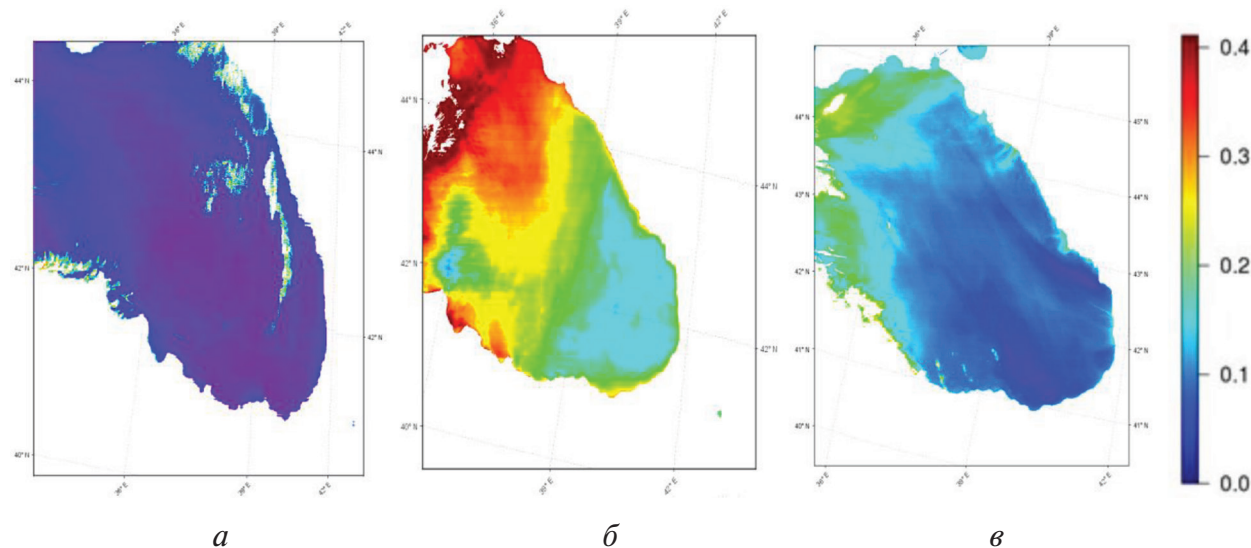


Рис. 3. Изменение AOT (MODIS Aqua) по координатам восточной части Чёрного моря для анализа влияния пыли и наличия облачности на коэффициенты $R_{rs}(\lambda)$: *a* — 08.09.2017 (чистая атмосфера); *б* — 12.09.2017 (пыль); *в* — 16.10.2019 (облачность)

Из рис. 2 видно, что средние значения $R_{rs}(\lambda)$ изменяются в зависимости от вариации параметра AOT. В интервалах с повышением AOT на 869 нм до 0,15 в большинстве случаев $R_{rs}(\lambda)$

в коротковолновой области спектра уменьшается, но далее при АОТ на 869 нм больше 0,15 наблюдается необычный результат работы стандартных алгоритмов атмосферной коррекции MODIS, а именно происходит резкое скачкообразное возрастание величин $R_{rs}(\lambda)$, включая длинноволновую область. Данный эффект также наблюдался 07.04.2021. Стоит отметить, что при анализе данных MODIS не было выявлено резких скачков параметра Ангстрема с изменением АОТ. Для подтверждения данного эффекта были проанализированы аналогичные координаты за предыдущие или последующие дни после пылевого переноса. Например, при пылевом переносе 12.09.2017 были проанализированы данные MODIS за 08.09.2017 (9–11 сентября наблюдалась сильная облачность над исследуемой частью) (рис. 3, см. с. 50).

Проиллюстрируем, каким образом ведут себя спектры $R_{rs}(\lambda)$, когда не наблюдается пылевого переноса, но величины АОТ принимают достаточно высокие значения. Был проанализирован снимок за 08.09.2017, который включал области вблизи суши и на границах с облаками (рис. 4).

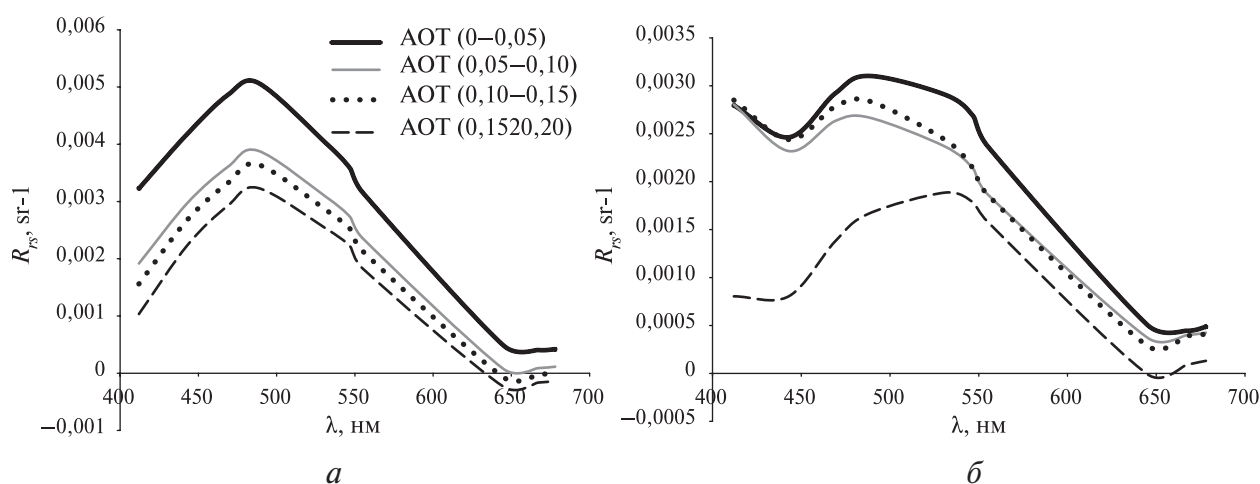


Рис. 4. Спектральные кривые средних значений $R_{rs}(\lambda)$ (MODIS Aqua) на 10 каналах длин волн в случаях различных диапазонов изменений АОТ: а — 08.09.2017 (безоблачная атмосфера); б — 16.10.2019 (облачность)

Траектории пылевых переносов, зарегистрированных над Чёрным морем, чаще всего пересекают и Средиземное море. Для подтверждения эффекта завышения спутником значений $R_{rs}(\lambda)$ при высоких АОТ и при наличии пылевого аэрозоля были рассмотрены шесть аналогичных случаев для Средиземного моря (01.04.2013, 10.09.2015, 08.10.2016 и 27.03.2018, 10.06.2020, 05.10.2020). Для Средиземного моря во всех случаях не был найден соответствующий эффект скачка. В свою очередь, алгоритмы показывали типичные значения для средних $R_{rs}(\lambda)$ даже с учётом очень высоких АОТ ($>0,35$) (рис. 5, см. с. 52).

Из рис. 5 видно, что при пылевом переносе вариации спутниковых значений $R_{rs}(\lambda)$ увеличиваются в сторону коротких длин волн и, за исключением рис. 5г, $R_{rs}(678 \text{ нм})$ близко к нулю вне зависимости от величин АОТ. Уменьшение $R_{rs}(\lambda)$ в «синих» каналах с ростом АОТ соответствует общим представлениям о влиянии поглощения на яркости атмосферной дымки.

Далее был проведён сравнительный анализ данных натурных измерений (AERONET) со значениями $R_{rs}(\lambda)$, определяемыми по данным дистанционного зондирования (MODIS). Всего в акватории Чёрного моря на 2021 г. расположено три станции, две из которых предоставляют значения ocean color, а конкретно измеряют нормализованную яркость моря (L_{nw}). Это станции Gloria (после 2019 г. — Section_7) и Galata_Platform. Все они располагаются в западной части Чёрного моря. К сожалению, станций AERONET, предоставляющих измерения яркости моря, в северо-восточной части Средиземного моря нет. Поэтому был проведён сравнительный анализ результатов измерений коэффициента $R_{rs}(\lambda)$ за одну дату пылевых переносов в западной части Чёрного моря, а именно за 12.09.2017 (рис. 6, см. с. 52).

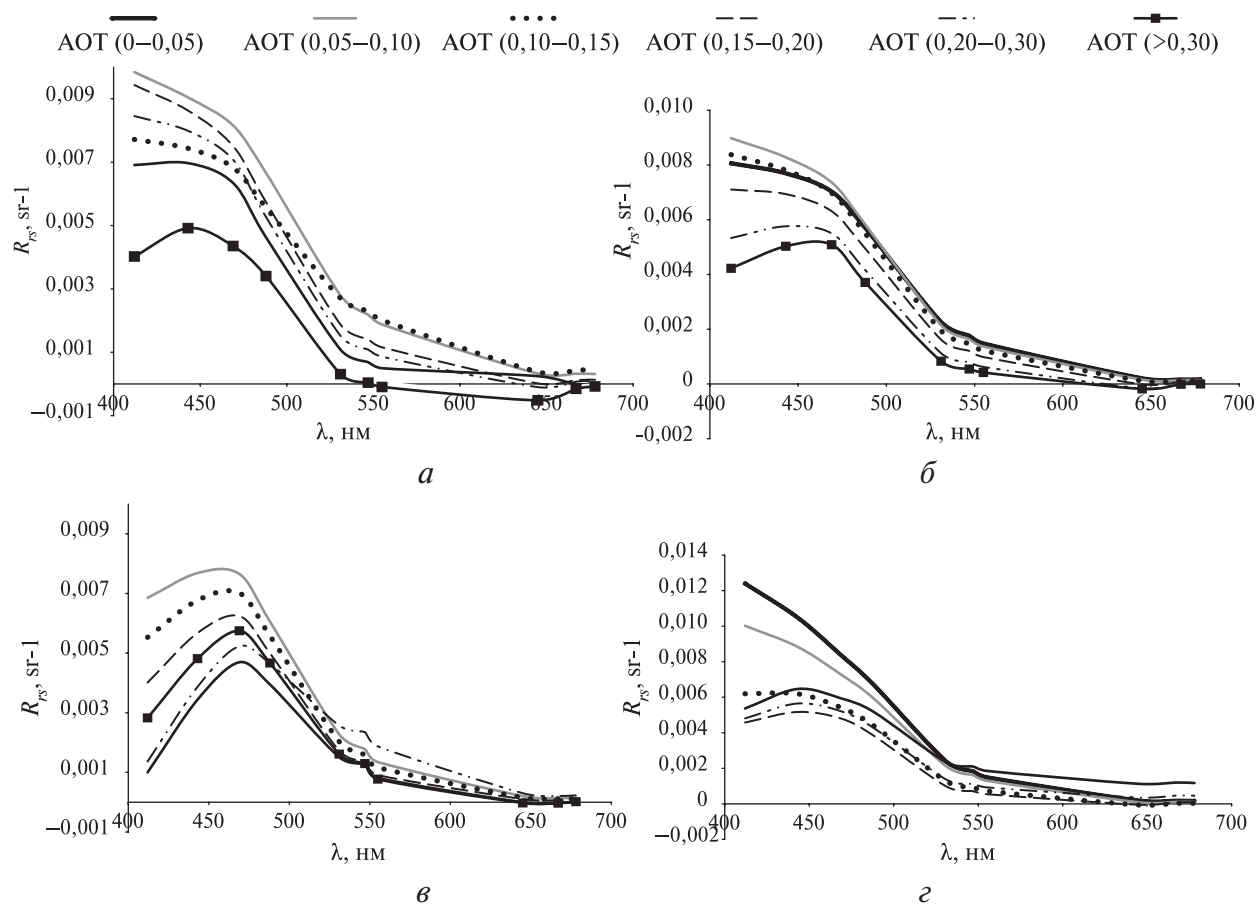


Рис. 5. Спектральные кривые средних по значениям АОТ в интервале значений $R_{rs}(\lambda)$ для Средиземного моря (MODIS Aqua) на 10 каналах длин волн в указанных диапазонах АОТ: а — 10.09.2015; б — 08.10.2016; в — 27.03.2018; г — 05.10.2020

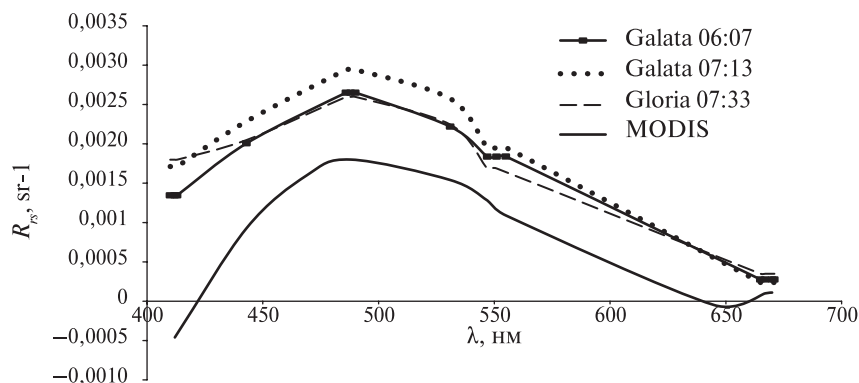


Рис. 6. Сравнение спектральных кривых $R_{rs}(\lambda)$ (MODIS Aqua) и натурных измерений AERONET за 12.09.2017

Из рис. 6 следует, что без разбиения по диапазонам вариации АОТ спутниковые значения спектрального коэффициента яркости Чёрного моря в целом занижены и становятся типичными для пылевого переноса в Чёрном море (Suslin et al., 2016).

Более подробно проанализируем результаты, представленные на рис. 2. Особое внимание следует обратить на высокие значения $R_{rs}(\lambda)$ в «красной» области видимого диапазона, практически никогда не наблюдаемые в Чёрном море. Как правило, алгоритмы атмосферной коррекции, основанные на идее экстраполяции величин рассеянного атмосферой излучения из ближней ИК-области в видимую, дают неплохую оценку для длинноволнового участка. Показанные ошибки возможны в случае больших ошибок оценки параметра Ангстрема

и в случае резкого увеличения альbedo однократного рассеяния (SSA) при переходе из ближней ИК-области спектра в видимую. Однако если бы неправильно оценивался параметр Ангстрема, то тогда $R_{rs}(\lambda)$ в «синей» области был бы существенно выше. Остаётся вариант, когда оптические свойства аэрозоля заметно меняются как раз при переходе от ближнего ИК-диапазона к видимому. В линейном приближении интенсивность рассеянного излучения пропорциональна произведению альbedo однократного рассеяния на АОТ. Тогда более низкие значения альbedo однократного рассеяния приведут к недооценке атмосферного сигнала в той области, где альbedo однократного рассеяния выше. Стоит отметить, что 11.09.2017, когда данный пылевой перенос пересекал акваторию Средиземного моря, показатель SSA изменяется несильно по возрастающему тренду с 0,91 до 0,99. На *рис. 7* построены среднедневные спектры SSA для натурных значений Gloria за 12.09.2017 (Чёрное море) и Athens-NOA (англ. National Observatory of Athens, Greek) за 11.09.2017 (Средиземное море).

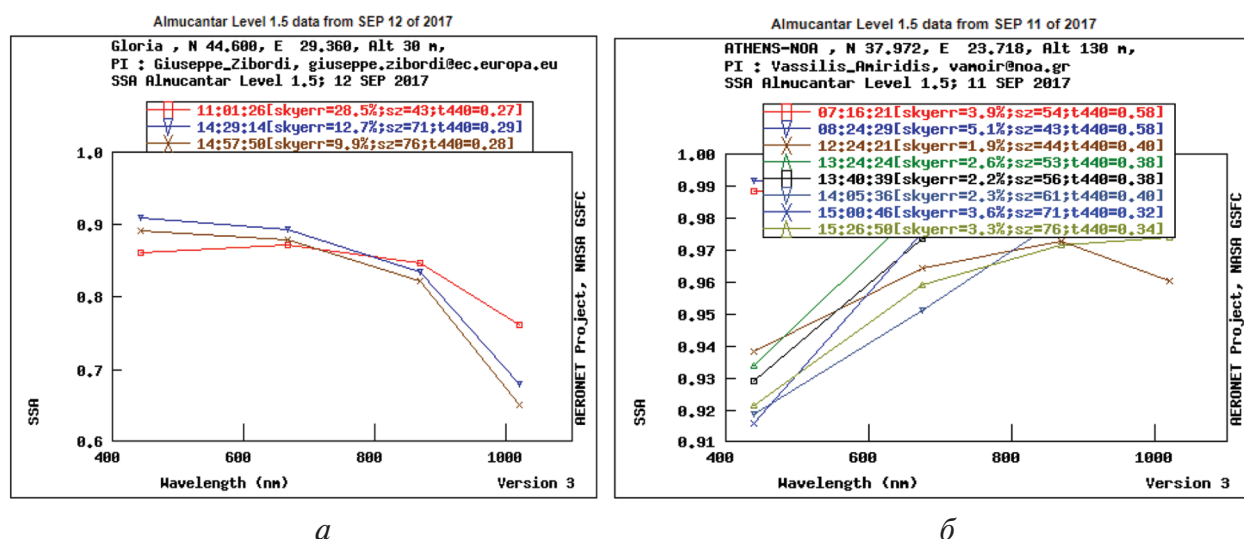


Рис. 7. Спектры среднедневных значений SSA для натурных значений Gloria за 12.09.2017 (*а*) и Athens-NOA за 11.09.2017 (*б*)

Из *рис. 7а* видно, что заметные спектральные изменения SSA действительно имели место при наблюдении со станции Gloria. Напротив, на станции Средиземного моря (см. *рис. 7б*) спектральные вариации по всему спектральному диапазону SSA примерно в 3,5 раза меньше, а при переходе от ближнего ИК-диапазона к длинноволновому участку видимого пренебрежимо малы. Этим, по-видимому, и объясняется отсутствие эффекта «скачка» в данных Level-2 MODIS для Средиземного моря. Следует отметить, что строгого соответствия между спектром показателя рассеяния в заданном направлении, от которого зависит величина рассеяния атмосферой в ИК-области, и спектром поглощения не существует. (Эти величины входят в формулу, определяющую величину SSA.) Более информативной была бы величина мнимой части показателя преломления как функция длины волны при известном законе распределения частиц по размерам. Тогда можно было бы рассчитать спектральные свойства рассеяния аэрозоля.

Заключение

В данной работе проводилось изучение влияния пылевого аэрозоля на результаты атмосферной коррекции MODIS и по натурным измерениям станций AERONET. При анализе 11 эпизодов, пять из которых были над акваторией Чёрного моря и шесть — Средиземного, сделан вывод о необходимости коррекции или создания регионального алгоритма для Чёрного моря. Несмотря на то, что для выбора модели аэрозоля спутником используются таблицы поиска

LUT (англ. Look Up Tables), основанные на многолетней статистике наблюдений со станций AERONET для различных типов аэрозолей, всё равно погрешности в алгоритме атмосферной коррекции присутствуют. В выводах данного исследования особое значение имеют высокие показатели $R_{rs}(\lambda)$ в красной области видимого диапазона, практически никогда не свойственные Чёрному морю. В работе показано, что низкие значения альбеда однократного рассеяния приводят к недооценке атмосферного сигнала в той области, где альбеда однократного рассеяния выше. Таким образом, при наличии пылевого аэрозоля вследствие спектральных особенностей альбеда однократного рассеяния при высоких АОТ спутниковые алгоритмы значительно завышали спектральный коэффициент яркости морской воды в длинноволновой области спектра в акватории Чёрного моря. Для Средиземного моря подобный эффект пылевого аэрозоля отмечался всего один раз. Сравнение SSA над Чёрным и Средиземным морями показало, что при распространении выносов пыли в атмосфере происходит заметная трансформация её спектральных поглощающих свойств.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, научный проект № 19-35-90066, и в рамках государственного задания МГИ РАН по теме № 0827-2019-0002. Работа проводилась в рамках государственного проекта № 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» (код «Оперативная океанология»).

Литература

1. 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.
2. Папкова А. С., Папков С. О., Шукало Д. М. CALIPSO стратификация атмосферного аэрозоля с экологической оценкой над Черноморским регионом // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. С. 234–242. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-234-242.
3. Ahmad Z., Franz B. A., McClain C. R., Kwiatkowska E. J., Werdell J., Shettle E. P., Holben B. N. New aerosol models for the retrieval of aerosol optical thickness and normalized water-leaving radiances from the SeaWiFS and MODIS sensors over coastal regions and Open Oceans // Applied Optics. 2010. V. 49. P. 5545–5560.
4. Anderson J. C., Wang J., Zeng J., Petrenko M., Leptoukh G. G., Ichoku C. Accuracy assessment of Aqua-MODIS aerosol optical depth over coastal regions: importance of quality flag and sea surface wind speed: preprint // Atmospheric Measurement Techniques Discussions. 2012. V. 5. P. 5205–5243. <https://doi.org/10.5194/amtd-5-5205-2012>.
5. Bailey S. W., Werdell P. J. A multi-sensor approach for the on-orbit validation of ocean color satellite data products // Remote Sensing of Environment. 2006. V. 102. Iss. 1–2. P. 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.01.015>.
6. Gordon H. R., Wang M. Influence of oceanic whitecaps on atmospheric correction of SeaWiFS // Applied Optics. 1994. V. 33. P. 7754–7763.
7. Kahn R. A., Sayer A. M., Ahmad Z., Franz B. A. The Sensitivity of SeaWiFS Ocean Color Retrievals to Aerosol Amount and Type // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2016. V. 33. P. 1185–1209. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-15-0121.1>.
8. Kalinskaya D. V., Papkova A. S. Effect of the absorbing aerosol on the value of the brightness spectral factor by AERONET data and MODIS satellite data over the Black Sea region // Proc. 25th Intern. Symp. Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics (SPIE). 2019. 112084R. <https://doi.org/10.1117/12.2540785>.
9. Lee S., Meister G. MODIS Aqua Optical Throughput Degradation Impact on Relative Spectral Response and Calibration of Ocean Color Products // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2017. V. 55. P. 5214–5219. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2703672>.
10. Mobley C., Werdell J., Franz B., Ahmad Z., Bailey S. Atmospheric Correction for Satellite Ocean Color Radiometry: NASA Technical Report NASA/TM–2016-217551. 2016. 85 p. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23016.78081>.

11. Omar A. H., Winker D., Vaughan M., Hu Y., Trepte C., Ferrare R., Lee P., Hostetler C., Kittaka C., Rogers R., Kuehn R. The CALIPSO Automated Aerosol Classification and Lidar Ratio Selection Algorithm // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2009. V. 26. P. 1994–2014. <https://doi.org/10.5194/amt-11-6107-2018>.
12. 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. P. 201. <https://doi.org/10.3390/fluids6060201>.
13. Schoeberl M., Newman P. A multiple-level trajectory analysis of vortex filaments // J. Geophysical Research. 1995. V. 25. P. 801–816.
14. Shi C., Nakajima T. Simultaneous determination of aerosol optical thickness and water-leaving radiance from multispectral measurements in coastal waters // Atmospheric Chemistry and Physics. 2018. V. 18. P. 3865–3884. <https://doi.org/10.5194/acp-18-3865-2018>.
15. Stefan S., Voinea S., GaIorga G. Study of the aerosol optical characteristics over the Romanian Black Sea Coast using AERONET data // Atmospheric Pollution Research. 2020. V. 11. P. 1165–1178. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.04.007>.
16. Suetin V. S., Korolev S. N. Estimating Specific Features of the Optical Property Variability in the Black Sea Waters Using the Data of SeaWiFS and MODIS Satellite Instruments // Physical Oceanography. 2018. V. 25(4). P. 330–340. DOI: 10.22449/1573-160X-2018-4-330-340.
17. Suslin V., Slabakova V., Kalinskaya D., Pryakhina S., Golovko N. Optical Features of the Black Sea Aerosol and the Sea Water Upper Layer Based on In Situ and Satellite Measurements // Physical Oceanography. 2016. V. 1. P. 20–32. DOI: 10.22449/0233-7584-2016-1-20-32.
18. Zibordi G., Mélin F., Berthon J.-F., Holben B., Slutsker I., Giles D., D'Alimonte D., Vandemark D., Feng H., Schuster G., Fabbri B. E., Kaitala S., Seppälä J. AERONET-OC: A Network for the Validation of Ocean Color Primary Products // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2009. V. 2. P. 1634–1651. <https://doi.org/10.1175/2009JTECHO654.1>.

Influence of dust aerosol on the results of atmospheric correction of remote sensing reflection of the Black and Mediterranean Seas from MODIS satellite data

A. S. Papkova, E. B. Shybanov

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

One of the main problems of oceanography is validating satellite and field data, studying the influence of the atmospheric component on the performance of satellite algorithms. In current research, we consider the effect of dust aerosol on the results of calculating the remote sensing reflectance of the Black and Mediterranean Seas from measurements by the MODIS Aqua satellite. Eleven cases of dust transport were accompanied by dust-specific changes in optical characteristics, such as: aerosol optical thickness, aerosol particle size distribution, Angstrom parameter and single scattering albedo. During the analysis of dust episodes, 5 of which were over the Black Sea and 6 over the Mediterranean Sea, it was concluded that it was necessary to correct or create a new regional algorithm for the Black Sea. Since in the presence of dust aerosol, as a result of high aerosol optical depth (AOT), satellite algorithms significantly overestimate the reflection coefficient of seawater, which may be due to the fact that not all geophysical factors occurring in the Black Sea basin are taken into account. In the Mediterranean, this effect was not observed. The study examined the dust days without clouds, blooming or highlights for assessing the exact contribution of dust.

Keywords: atmospheric correction, dust aerosol, remote sensing reflectance, sea brightness, aerosol optical depth, Angstrom parameter, single scattering albedo, MODIS, AERONET

Accepted: 01.12.2021
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-46-56

References

1. 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).
2. Papkova A. S., Papkov S. O., Shukalo D. M., CALIPSO stratification of atmospheric aerosols with environmental assessment of dust content over the Black Sea region, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, pp. 234–242 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-234-242.
3. Ahmad Z., Franz B. A., McClain C. R., Kwiatkowska E. J., Werdell J., Shettle E. P., Holben B. N., New aerosol models for the retrieval of aerosol optical thickness and normalized water-leaving radiances from the SeaWiFS and MODIS sensors over coastal regions and Open Oceans, *Applied Optics*, 2010, Vol. 49, pp. 5545–5560.
4. Anderson J., Wang J., Zeng J., Petrenko M., Leptoukh G. G., Ichoku C., Accuracy assessment of Aqua-MODIS aerosol optical depth over coastal regions: importance of quality flag and sea surface wind speed: preprint, *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 2012, Vol. 5, pp. 5205–5243, <https://doi.org/10.5194/amtd-5-5205-2012>.
5. Bailey S. W., Werdell P. J., A multi-sensor approach for the on-orbit validation of ocean color satellite data products, *Remote Sensing of Environment*, 2006, Vol. 102, Issue 1–2, pp. 12–23, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.01.015>.
6. Gordon H. R., Wang M., Influence of oceanic whitecaps on atmospheric correction of SeaWiFS, *Applied Optics*, 1994, Vol. 33, pp. 7754–7763.
7. Kahn R. A., Sayer A. M., Ahmad Z., Franz B. A., The Sensitivity of SeaWiFS Ocean Color Retrievals to Aerosol Amount and Type, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2016, Vol. 33, pp. 1185–1209, <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-15-0121.1>.
8. Kalinskaya D. V., Papkova A. S., Effect of the absorbing aerosol on the value of the brightness spectral factor by AERONET data and MODIS satellite data over the Black Sea region, *Proc. 25th Intern. Symp. Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics (SPIE)*, 2019, 112084R, <https://doi.org/10.1117/12.2540785>.
9. Lee S., Meister G., MODIS Aqua Optical Throughput Degradation Impact on Relative Spectral Response and Calibration of Ocean Color Products, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2017, Vol. 55, pp. 5214–5219, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2703672>.
10. Mobley C., Werdell J., Franz B., Ahmad Z., Bailey S., *Atmospheric Correction for Satellite Ocean Color Radiometry: NASA Technical Report NASA/TM–2016-217551*, 2016, 85 p., <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23016.78081>.
11. Omar A. H., Winker D., Vaughan M., Hu Y., Trepte C., Ferrare R., Lee P., Hostetler C., Kittaka C., Rogers R., Kuehn R., The CALIPSO Automated Aerosol Classification and Lidar Ratio Selection Algorithm, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, Vol. 26, pp. 1994–2014, <https://doi.org/10.5194/amt-11-6107-2018>.
12. 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, p. 201, <https://doi.org/10.3390/fluids6060201>.
13. Schoeberl M., Newman P., A multiple-level trajectory analysis of vortex filaments, *J. Geophysical Research*, 1995, Vol. 25, pp. 801–816.
14. Shi C., Nakajima T., Simultaneous determination of aerosol optical thickness and water-leaving radiance from multispectral measurements in coastal waters, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, Vol. 18, pp. 3865–3884, <https://doi.org/10.5194/acp-18-3865-2018>.
15. Stefan S., Voinea S., GaIorga G., Study of the aerosol optical characteristics over the Romanian Black Sea Coast using AERONET data, *Atmospheric Pollution Research*, 2020, Vol. 11, pp. 1165–1178, <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.04.007>.
16. Suetin V. S., Korolev S. N., Estimating Specific Features of the Optical Property Variability in the Black Sea Waters Using the Data of SeaWiFS and MODIS Satellite Instruments, *Physical Oceanography*, 2018, Vol. 25(4), pp. 330–340, DOI: 10.22449/1573-160X-2018-4-330-340.
17. Suslin V., Slabakova V., Kalinskaya D., Pryakhina S., Golovko N., Optical Features of the Black Sea Aerosol and the Sea Water Upper Layer Based on In Situ and Satellite Measurements, *Physical Oceanography*, 2016, Vol. 1, pp. 20–32, DOI: 10.22449/0233-7584-2016-1-20-32.
18. Zibordi G., Mélin F., Berthon J.-F., Holben B., Slutsker I., Giles D., D’Alimonte D., Vandemark D., Feng H., Schuster G., Fabbri B. E., Kaitala S., Seppälä J., AERONET-OC: A Network for the Validation of Ocean Color Primary Products, *Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, Vol. 2, pp. 1634–1651, <https://doi.org/10.1175/2009JTECHO654.1>.