

На правах рукописи

Папкова Анна Станиславовна

**УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ПЫЛЕВОГО АЭРОЗОЛЯ НА ВОССТАНОВЛЕНИЕ
СПЕКТРАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ЯРКОСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ ПО
СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ**

Специальность 1.6.17 – Океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Севастополь – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Морской гидрофизический институт РАН»

Научный руководитель доктор физико-математических наук,
Шибанов Евгений Борисович

Официальные оппоненты: Сакерин Сергей Михайлович
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева
Сибирского отделения Российской академии наук,
главный научный сотрудник лаборатории оптики
аэрозоля

Салюк Павел Анатольевич
кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Тихоокеанский океанологический институт
им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения
Российской академии наук, заведующий лабораторией
спутниковой океанологии и лазерного зондирования

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

Защита состоится «31» марта 2023 г. в 14 часов 00 минут на заседании Диссертационного совета 24.1.229.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Морской гидрофизический институт РАН» по адресу: 299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН» и на сайте института http://mhi-ras.ru/assets/files/Papkova_thesis.pdf.

Автореферат разослан «20» января 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.229.02
кандидат физико-математических наук **Алексеев Дмитрий Владимирович**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Информация о биооптических характеристиках состояния морской среды содержится в яркости излучения, вышедшего из водной толщи $L_w(\lambda)$ (Morel et al., 1977; Gordon et al., 1994; Копелевич и др., 2017). Спектральная яркость выходящего из воды излучения определяется оптическими свойствами морской воды, которые зависят от количественного и качественного состава, содержащегося в ней вещества. Размер, форма и химический состав аэрозольных частиц также определяют их поглощающие и рассеивающие свойства и, следовательно, влияют на яркость, получаемую прибором дистанционного зондирования (Shettle et al. 1979; Ahmad et al., 2010; Dubovik et al., 2000; Jamet et al., 2004). Известно, что спутниковые сканеры цвета, например, MODIS Aqua, измеряют спектральные величины яркости восходящего излучения на верхней границе атмосферы (L_{TOA}), которая складывается из нескольких составляющих - рэлеевское рассеяние, отражённая от поверхности воды компонента, выходящая из толщи воды компонента и рассеяние аэрозольными частицами (Gordon, 1978; Ruddick et al., 2000; Moore et al., 1999; Siegel et al., 2000; Stumpf et al., 2003; Bailey et al., 2010). Таким образом, для получения достоверного значения величины L_w , необходима процедура «атмосферной коррекции», а именно исключение вкладов всех других составляющих из величины L_{TOA} (Gao et al., 2000; Wang and Shi, 2007; Oo et al., 2008; Wang et al., 2009 Land and Haigh, 1997; Chomko and Gordon, 1998; Stamnes et al., 2003; Kuchinke et al., 2009; Shi et al., 2016). Трудность решения задачи атмосферной коррекции определяется, прежде всего, тем, что даже при условии чистой воды в глубоком океане, значение L_w в синей части спектра составляет всего около 10–15 % от общей яркости на верхней границе атмосферы, в которой преобладает в основном рэлеевское и аэрозольное рассеяние на молекулах воздуха и аэрозолей соответственно. В прибрежных районах, вклад L_w в яркость на верхней границе атмосферы TOA может уменьшиться менее чем до 5% из-за увеличения поглощения хлорофиллом и окрашенным растворенным органическим веществом ($CDOM$) в толще воды (Копелевич и др., 2017; Morel et al., 1979). Для минимизации влияния геометрии наблюдения и оптических свойств атмосферы, Гордон (1989) ввел в качестве характеристики восходящего от морской поверхности излучения понятие нормализованной яркости L_{wn} , которая выражается через $L_w(\lambda)$ путем деления на спектральное пропускание атмосферой нисходящего солнечного излучения и косинус зенитного угла Солнца (Gordon, 1989). На данный момент величина $L_{wn}(\lambda)$ используется в качестве стандартного продукта обработки данных, но в качестве конечного продукта атмосферной коррекции спутниковых данных чаще используется связанный с ней коэффициент яркости моря $Rrs(\lambda)$, который вычисляется как отношение нормализованной яркости к величине солнечной постоянной для соответствующего спектрального канала.

Контроль ошибок атмосферной коррекции выполняется посредством измерений значений спектрального коэффициента яркости *in situ* и их последующего сравнения со значениями, рассчитанными по спутниковым данным. Теоретические оценки показывают, что погрешность экстраполяции величины

аэрозольного рассеяния на длине волны λ пропорциональна полиному второй степени от волнового числа $k = 2\pi/\lambda$. Квадратичная зависимость ошибок от k объясняется неточными оценками вклада мелкодисперсной фракции аэрозольных частиц в радиацию, рассеянную атмосферой (Moulin, C et al., 2001; Паршиков С.В. и др. 1992; Суетин В.С. и др., 2004; Корчемкина Е.Н. и др., 2009; Shibakov E.B. et al., 2008).

Следует отметить, что результаты спутниковых алгоритмов регулярно калибруются с использованием новых подходов (IOCCG (2006).; IOCCG (2007).; IOCCG (2008).; IOCCG (2010).; IOCCG (2012); IOCCG (2014)). Тем не менее, несмотря на это, был отмечен ряд систематических ошибок стандартных алгоритмов, в основном вызванных следующими причинами:

1. неопределённость в оценках значений коэффициента яркости моря во всём видимом диапазоне из-за бимодального распределения аэрозольных частиц по размеру и вариации параметров распределения внутри каждой моды (Суетин В.С. и др., 2004; Корчемкина Е.Н. и др., 2009; Корчемкина Е.Н. и др., 2022);

2. пространственная неоднородность атмосферы (атмосферные фронты, границы облаков) (Frouin et al., 2014);

3. поглощающий аэрозоль (пыль, смог) и его вертикальное распределение (Суетин и др., 2002; Shybanov et al., 2021; Суетин и др., 2021; Suslin et al., 2016; Kalinskaya et al., 2022).

Случаи пылевых выносов характеризуются тем, что средняя высота расположения поглощающих частиц заметно больше, чем у аэрозолей промышленного и континентального типа. Влияние перечисленных факторов усугубляется нелинейной зависимостью яркости рассеянной радиации от оптических толщин молекулярной и аэрозольной компоненты. В результате получаем комбинацию ошибок атмосферной коррекции для значений спектральной яркости восходящего излучения в случаях присутствия поглощающего аэрозоля над Черноморским регионом. Так как поглощающий аэрозоль ухудшает качество стандартных спутниковых продуктов, идентификация пыли и определение ее оптических свойств является сложной задачей, актуальной для акватории Черного моря. Таким образом, для дистанционного зондирования цвета океана в условиях нахождения пылевого аэрозоля нужны реалистичные модели пыли и информация о вертикальном распределении. В настоящее время ни один из предложенных методов, где учитывается наличие пылевого аэрозоля в атмосфере, не нашел широкого применения для автоматизированной атмосферной коррекции, поскольку они требуют дополнительной информации о стратификации аэрозоля (Gordon et al., 1997; Chomko et al., 1998; Antoine et al., 1999). На данный момент информацию о стратификации аэрозоля предоставляет радар *CALIOP* (миссия *CALIPSO*) (Kim et al., 2018; Omar et al., 2009). Предполагается, что высота пылевого аэрозоля вдоль трекинга *CALIPSO* репрезентативна для всего пылевого региона, но в реальных условиях это может привести к ошибкам при восстановлении величины L_{wp} . Таким образом, по-прежнему необходимы дальнейшие исследования по совершенствованию моделей аэрозоля, которые имеют целью получение информации о высоте аэрозоля, его пространственному распределению, коррекции

спутниковых продуктов цвета океана и оценке региональных особенностей влияния пыли на восстановление коэффициента яркости моря.

Цель диссертационной работы – разработка алгоритма дополнительной коррекции спутниковых значений коэффициента яркости моря при наличии пылевого аэрозоля над акваторией Черного моря.

В рамках поставленной цели решались следующие задачи:

1. Исследование изменчивости коэффициента яркости в Черном море и выявление факторов, влияющих на его вариативность.
2. Разработка математического аппарата для проверки качества натурных измерений коэффициента яркости моря, измеряемого в сети AERONET-OC.
3. Оценка влияния пылевого аэрозоля на коэффициент яркости моря, получаемый по спутниковым данным с использованием стандартной атмосферной коррекции NASA.
4. Создание алгоритма дополнительной коррекции спутниковых значений коэффициента яркости для случаев наличия пылевого аэрозоля над Черным морем.

Объект исследования – спутниковый продукт «спектральный коэффициент яркости моря». **Предмет исследования** – алгоритм определения спектрального коэффициента яркости моря методами дистанционного зондирования при наличии пылевого аэрозоля над Черным морем.

Научная новизна исследования.

1. Впервые предложена аналитическая формула, описывающая эффект влияния пылевого аэрозоля на измеряемую яркость на верхней границе атмосферы. Показано, что при поглощающем аэрозоле погрешность атмосферной коррекции близка к λ^{-4} .
2. На основании многолетнего сравнительного анализа натурных и спутниковых измерений коэффициента яркости моря в акватории Черного моря, получены статистические закономерности ошибки атмосферной коррекции при различных состояниях атмосферы. Для повышения качества натурных измерений AERONET-OC, предложено использовать стандартную оптическую модель моря. Установлено, что в случаях наличия пыли, первый собственный вектор ошибки атмосферной коррекции пропорционален $\lambda^{-3,6}$.
3. Впервые разработан региональный алгоритм дополнительной коррекции спутниковых значений коэффициента яркости Черного моря при наличии пылевого аэрозоля. Метод основан на обнаруженной закономерности постоянства индекса цвета на длинах волн 412 нм и 443 нм для вод Черного моря. Проведен кластерный анализ многолетнего массива данных об изменчивости коэффициента яркости моря по данным с платформ AERONET-OC. Было показано, что для всех кластеров условие постоянства $CI(412/443)$ сохраняются.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы.

Полученные в работе оценки ошибок атмосферной коррекции в присутствии пылевого аэрозоля, могут быть использованы для широкого спектра задач оптики атмосферы. Поправки атмосферной коррекции улучшат надежность спутниковой информации о коэффициенте яркости моря. Разработанный алгоритм дополнительной атмосферной коррекции данных существенно повысит точность

спутниковой информации, которая в свою очередь повлияет на достоверность результатов экологических моделей, где входным параметром является концентрация хлорофилла-*a*. Алгоритмы и математический аппарат, созданные на основе задач диссертационного исследования, могут быть использованы для решения задач оптики атмосферы и интерпретации данных спутникового зондирования.

Все предложенные в диссертации теоретические разработки и модели с теоретическим обоснованием опубликованы в научной печати, являются общедоступным для применения.

Метод исследования основан на сопоставлении экспериментальных данных: сканера MODIS Aqua/Terra и измерений с сети станций AERONET-OC. Для обработки данных привлекался математический пакет Python. Анализ и визуализация спутниковых снимков произведена в SeaDAS. Для решения обратных задач атмосферной оптики используются аэрозольная модель, основанная на микрофизических параметрах, а также физико-математическое моделирование дистанционных оптических измерений. Методология и методы диссертационного исследования включают: анализ изменчивости коэффициента яркости моря, вычисление индексов цвета для различных комбинаций длин волн, анализ значений оптической толщины атмосферы, определение оптических характеристик пыли, а также численное моделирование ошибки атмосферной коррекции.

Положения, выносимые на защиту.

1. Аналитическая формула, описывающая ошибку спектрального коэффициента яркости моря при наличии в атмосфере поглощающего аэрозоля.
2. Спектральная зависимость первого собственного вектора ошибки стандартной атмосферной коррекции при наличии пылевого аэрозоля.
3. Алгоритм дополнительной коррекции спутниковых данных для Черного моря, использующий постоянство отношения коэффициентов яркости в коротковолновой области видимого диапазона.

Степень достоверности результатов диссертации.

Научная обоснованность и достоверность научных результатов, разработанных методов и моделей подтверждаются тем, что в работе были использованы стандартные методы и подходы оптики моря и атмосферы, в частности, разнообразное тестирование алгоритмов и соответствующих компьютерных кодов и сравнение с результатами аналогичных независимых расчетов. При определении конкретных аэрозольных параметров наряду с методами дистанционного зондирования применялись продукты, предоставляемые с платформ AERONET, качество которых гарантировано NASA. Использование разработанных автором моделей в ряде конкретных задач спутникового зондирования явилось прямой практической проверкой их достоверности.

Связь диссертационной работы с научными программами.

Работа выполнялась в соответствии с двумя научными планами и программами исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Морской гидрофизический институт РАН» в рамках программ

государственного задания, а также проекта № 19-35-90066 Российского Фонда Фундаментальных Исследований (РФФИ).

Личный вклад автора. Постановка ряда задач научного исследования проводилась под руководством научного руководителя Шибанова Е.Б., с которым обсуждались полученные результаты и формулировки выводов. Соискатель принимала непосредственное участие в обработке данных дистанционного зондирования и натурных измерений коэффициента яркости Черного моря, предоставляемого с платформ AERONET-ОС. Был осуществлён анализ спутниковых снимков с сопутствующим анализом обратных траекторий движения аэрозолей. Автором был подготовлен массив данных с датами переноса пылевого аэрозоля над акваторией Черного моря. Данный массив содержал: коэффициенты яркости моря по *in situ* и спутниковым измерениям в анализируемые даты, оптические характеристики атмосферы. Папковой А.С. были написаны программные коды и рассчитаны результаты при кластеризации многолетнего массива натурных измерений коэффициента яркости моря с платформ AERONET-ОС. Соискателем выполнена основная часть работы по статистическому анализу, визуализации и теоретической интерпретации полученных результатов.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы, докладывались на семинарах отдела оптики и биофизики моря, отделения оперативной океанографии ФГБУН ФИЦ МГИ, а также на следующих международных и всероссийских научных конференциях: научная конференция "Моря России: вызовы отечественной науки" (Севастополь, 27-30 сентября 2022); Научная конференция "Моря России: наука, безопасность, ресурсы" (Севастополь, 3-7 октября 2017); XXVIII Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы" (04-08 июля, Томск 2022); XXVII Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы" (05-09 июля, Москва 2021); XXVI Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы" (Москва, 6-10 июля 2020); XXV Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", (1-5 июля 2019, Новосибирск); XXV международная научно-техническая конференция "Прикладные задачи математики" (Севастополь, 18-22 сентября 2017); III Всероссийская конференция молодых ученых "Комплексные исследования мирового океана" (Севастополь, 21-25 мая 2018); Шестнадцатая Всероссийская открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса" (Москва, 12-16 ноября 2018); International multidisciplinary scientific geoconference surveying geology and mining ecology management, SGEM (Bulgaria, 2019); X Юбилейная Всероссийская конференция "Современные проблемы оптики естественных вод". X Юбилейная Всероссийская конференция с международным участием (Санкт-Петербург, 9-11 октября 2019); V Всероссийская конференция молодых ученых «Комплексные исследования мирового океана» (Калининград, 21-25 мая 2020).

Публикации по теме диссертации. Результаты работы опубликованы в соавторстве в 17 научных работах, из них: 8 публикаций в рецензируемых журналах, удовлетворяют требованиям ВАК при Минобрнауки России, включены в международные наукометрические базы данных «SCOPUS» и «Web of Science» [1–

8]. 6 тезисов докладов на научных конференциях, входящих в базу данных РИНЦ, «SCOPUS» и «Web of Science».

Структура диссертации. Работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы. Полный объем диссертации составляет 117 страниц. Список литературы содержит 111 наименований и занимает 13 страниц. В диссертацию включено 12 таблиц, 24 рисунка.

Благодарности. Автор выражает благодарность своему научному руководителю – д.ф.-м.н., ведущему научному сотруднику отдела оптики и биофизики моря МГИ РАН Шибанову Е.Б. за внимательное руководство работой, полезные комментарии и замечания. Автор благодарит коллектив отдела оптики и биофизики моря МГИ РАН, в особенности заведующего отделом, профессора, д.ф.-м.н. Ли М.Е. за полезные советы о визуализации результатов, а также младшего научного сотрудника Калинскую Д.В. за помощь в разработке методологии для идентификации пылевого аэрозоля и к.ф.-м.н. Корчемкину Е.Н. за предоставление экспедиционных данных. Автор выражает благодарность к.ф.-м.н., ведущему научному сотруднику, заведующему отделом динамики океанических процессов МГИ РАН Суслину В.В. за полезные советы в течение всего периода написания работы, помощь в улучшении структуры работы и предоставленные графические материалы. Так же автор благодарит к.ф.-м.н., заведующего отделом дистанционных методов исследований МГИ РАН Сергея Владимировича Станичного за ценные советы по содержанию работы. Соискатель благодарит д.ф.-м.н., главного научного сотрудника, заведующего лабораторией прикладной физики моря МГИ РАН Дулова В.А. за полезные замечания и комментарии по изложению материала диссертации. Так же автор благодарит к.ф.-м.н. Ужегова В.Н. (ФГБУН институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева) за первичное рецензирование работы, полезные комментарии и замечания.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** (15 с.) дано обоснование актуальности темы, определена основная цель исследования, перечислены поставленные задачи, основные положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность полученных результатов, их научная и практическая значимость. Представлены личный вклад автора, апробация результатов исследования и список публикаций по теме диссертации.

Первый раздел (28 с.) работы посвящен обзору основных результатов предыдущих исследований в области атмосферной коррекции, изменчивости спектрального коэффициента яркости при различных атмосферных условиях. На основе анализа публикаций сделан вывод, что в случаях наличия поглощающего аэрозоля в атмосфере зачастую воспроизводятся физически некорректные величины спектрального коэффициента яркости моря (отрицательные величины) в интервалах 412–443 нм. Стала очевидна проблема учета данного типа аэрозоля для проведения качественной атмосферной коррекции (Gordon et al., 1997; Chomko et al., 1998; Antoine et al., 1999, Суетин и др., 2004). В обзоре рассмотрены существующие

методы учета поглощающего аэрозоля в задачах атмосферной коррекции. В настоящее время ни один из описанных выше методов не нашел широкого применения для автоматизированной атмосферной коррекции в присутствии пылевого аэрозоля поскольку они требуют дополнительной информации о стратификации (Gordon et al., 1997; Chomko et al., 1998; Antoine et al., 1999).

Во **Втором разделе** (11 с.) дано описание приборов, использовавшихся для проведения натурных измерений (подраздел 2.1); спутниковых сканеров цвета, данные которых использовались в работе (подраздел 2.2); описание базы данных для валидации спутниковых и натурных измерений (подраздел 2.3).

В *подразделе 2.1* кратко описаны натурные измерения оптических характеристик атмосферы со станций наземных спектрофотометров AERONET (Aerosol Robotic Network) (Holben et al., 1998) для Черноморского региона (Gloria (44,600N, 29,360E), Galata_Platform (далее Galata) (43,045N, 28,193E)). Сеть AERONET, разработанная для проведения исследований атмосферы, позже была расширена для поддержки морских приложений. Новый сетевой компонент называется AERONET Ocean Color (AERONET-OC) и обеспечивает дополнительную возможность измерения коэффициента яркости моря (L_w) на 400, 412, 443, 490, 510, 560, 620, 667, 779, 865 и 1020 нм (Zibordi et al., 2009). Так же в подразделе 2.1. представлен краткий сравнительный анализ оптических характеристик атмосферы при условии нахождения пылевого аэрозоля и без него (фоновый аэрозоль). Средние значения аэрозольной оптической толщины (AOT) на разных длинах волн в дни пылевых переносов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Средние значения *in situ* AOT для случаев пылевого переноса и для фонового аэрозоля над Черноморским регионом

	AOT ₁₀₂₀	AOT ₈₇₀	AOT ₆₇₅	AOT ₅₀₀	AOT ₄₄₀
Пыль	0.131±0.06	0.146±0.06	0.176±0.07	0.237±0.08	0.264±0.09
Без пыли	0.072±0.03	0.087±0.04	0.121±0.05	0.19±0.07	0.22±0.08

Сравнительный анализ данных из таблицы 1, показал, что при наличии пылевого аэрозоля величина AOT спектрально возрастает. Наибольшее расхождение в значениях присутствует в длинноволновой области. Среднедневное значение AOT при высокой концентрации пыли над Черным морем может превышать среднемесячные значения в 1,5–2 раза (Папкова и др., 2021). Параметр Ангстрем 440–870 нм используется в качестве индикатора размера частиц (крупнодисперсных или мелкодисперсных аэрозолей) (Basart et al., 2009). При наличии чистой пыли, доминирует крупнодисперсная фракция аэрозоля, следовательно, предел значения AE (≤ 0.75) (Gkikas et al., 2021).

Для дополнительной информации о природе аэрозоля пустынного происхождения анализировались 7-дневные обратные траектории движения аэрозолей, которые основаны на кинематическом анализе, с использованием агрегированных данных NASA GMAO (Global Modeling Assimilation Office) и анализа NCEP (Национальных центров экологического прогнозирования) (Schoeberl et al., 1995). Если начало траектории находится вблизи расположения пустыни (Сахара, пустыни Аравийского полуострова, Каракумы и т.д), то с большой

вероятностью пылевой аэрозоль может быть идентифицирован и над Черноморским регионом (Калинская и др., 2015).

В *подразделе 2.2.* дано описание спутниковых продуктов, которые использовались в диссертации. Основным спутниковым продуктом второго уровня является коэффициент яркости моря. Спектральный коэффициент яркости моря $Rrs(\lambda)$ (sr^{-1}), для данных MODIS определяется для спектральных каналов 412, 443, 469, 488, 531, 547, 555, 645, 667, 678 нм. Концентрация хлорофилла-*a*, ($mg\ m^{-3}$) по данным MODIS рассчитывается через значения $Rrs(\lambda)$ для 2–4 длин волн из диапазона 440–670 нм. Для MODIS Aqua оптическая толщина аэрозоля определяется стандартно в длинноволновой области на 869 нм. Параметр Ангстрем (AE) вычисляется как отношение AOT на 443 и 865 нм. Основным способом определения наличия пылевого аэрозоля над акваторией Черного моря, является визуальный анализ спутниковых снимков и явное завышение AOT (Калинская, 2012).

В *подразделе 2.3* описывается система проверки SeaBASS (SeaWiFS Bio-optical Archive and Storage System), которая предоставляет синхронные пары измерений спектрального коэффициента яркости по спутниковым и натурным измерениям (Werdell et al., 2002). При подготовке данных для занесения в базу SeaBASS исключаются все пиксели, содержащие следующие флаги ошибок: земля (LAND), засветка (STRAYLIGHT, HIGLINT, HILT, ATMWAR), LOWLW ($Lw(555\text{ нм}) < 0,15$) и ошибки навигации (NAVFAILE), границы облаков или лед (CLDICE). Стоит отметить, что поскольку данные *in situ* редко осуществляются именно в момент съемки спутником, допускается порог временного окна, а именно ± 3 часа. Поскольку спектральные каналы измерений *in situ* и спутникового сканера не совпадают, то для дальнейшего сравнительного анализа, проводится интерполяция данных. Для восстановления промежуточных значений спектрального коэффициента яркости моря используется две общепринятые методики (O'Reilly et al., 2019). Первая из них основывается на линейной интерполяции результатов натурных измерений между двумя ближайшими каналами, вторая на логарифмическом преобразовании.

В заключение раздела 2 приводятся выводы.

Для решения поставленных задач диссертационного исследования выбраны инструменты дистанционного зондирования (MODIS Aqua), источник натурных измерений спектрального коэффициента яркости моря в западной части Черного моря (AERONET-OC), а также оптических характеристик атмосферы (AERONET). Для подтверждения наличия пылевого аэрозоля использовались обратные 7-ми дневные траектории AERONET (Goddard Code 614), включая визуальный анализ спутниковых снимков с MODIS Aqua и дополнительный анализ оптических характеристик атмосферы по натурным измерениям со станций AERONET (AOT, параметр Ангстрем, альbedo однократного рассеяния).

В **Третьем разделе** (16 с.) рассматриваются, изменчивость яркости моря в западной части Черного моря и вариативность индекса цвета по данным платформ AERONET-OC.

В *подразделе 3.1* рассматривается критерий для проверки качества *in situ* измерений коэффициента яркости моря с платформ AERONET–OC (Gloria, Galata). Для этой цели предлагается статистический метод сравнения данных с платформ AERONET–OC и стандартной оптической модели – трёхпараметрическая модель (Morel A et al., 1977), где модельное значение спектрального коэффициента яркости моря рассчитывается при $k = 0,15$ по формуле

$$\rho(\lambda) = k \frac{b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda_0) \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^\gamma}{a_w(\lambda) + C_{chl} \cdot a_{chl}^*(\lambda) + C_{ddm} e^{-\alpha(\lambda - \lambda_0)}} \quad (1)$$

где b_{bw} – показатель обратного рассеяния чистой воды;
 $b_{bp}(\lambda_0)$ – общий показатель обратного рассеяния на длине волны λ_0 ;
 γ – параметр наклона спектра поглощения органики;
 $a_w(\lambda)$ – показатель поглощения чистой воды;
 C_{chl} – концентрация хлорофилла;
 $a_{ph}^*(\lambda)$ – удельный показатель поглощения фитопланктона по модели, описанной в (Корчемкина и др., 2009) при заданной концентрации хлорофилла, $C_{chl} = 0.75 \text{ мг/м}^3$ (Чурилова и др., 2004);
 α – параметр спектрального наклона поглощения неживой органики;
 C_{ddm} – концентрация органического вещества, детрита и желтого вещества.

Поскольку выражение (1) линейно относительно параметров поглощения (концентраций хлорофилла и органического вещества), то при заданном значении обратного рассеяния эти параметры однозначно определяются решением системы двух линейных уравнений, после взятия частных производных. Далее, происходило вычисление невязки *in situ* значений $Rrs(\lambda)$ и значений по трёхпараметрической оптической модели по правилу $\frac{2\sigma}{\max(Rrs(\lambda))}$. Нормирование на максимум

коэффициента яркости необходимо, так как величина рассеяния определяет коэффициент яркости в прибрежных водах и может сильно варьироваться. Далее отсеивались все значения, имеющие величину невязки между *in situ* значениями и трёхпараметрической моделью больше, чем допустимые значения оптимизированной невязки. Для Черного моря максимальный допустимый порог невязки составлял – 0,0505. Таким образом, исходя из данных SeaBASS для акватории Черного моря, показано, что 21% от всех *in situ* измерений $Rrs(\lambda)$ имеют явные расхождения с модельными значениями трёхпараметрической модели и, как следствие, должны быть убраны из дальнейшего анализа данных. При анализе всех среднесуточных коэффициентов яркости Черного моря, предоставляемых AERONET–OC с 2011 по 2022 год, процент выбросов составлял 13% от общего массива данных. Предположительно, данные погрешности связаны с недостаточной оценкой вклада эффекта поляризации при измерениях и отраженной составляющей (неоднородность небосвода, волнения, поляризация).

В *подразделе 3.2* в ходе автоматизированного кластерного анализа представлена изменчивость спектрального коэффициента яркости при различных

внешних условиях (сезонные цветения, речной сток и т.д.). Кластерный анализ был реализован в *Python* с использованием функции *K-Means*. Входными данными для процедуры служили: данные *in situ* $Rrs(\lambda)$ со станций AERONET-OC на 412 нм, 443 нм, 490 нм, 510 нм, 560 нм, 667 нм и модельный максимум, вычисленный по трёхпараметрической модели (подраздел 3.1). Стоит отметить, что значения на 547 нм и 555 нм интерполировались по общепринятой методике (O'Reilly et al., 2019). В ходе кластерного анализа выделяются 5 явных групп. Диапазон максимумов 490-500 нм (кластер 1, кластер 2, кластер 4), 535-549 нм (кластер 5), 560-565 нм (кластер 3) (рисунок 1).

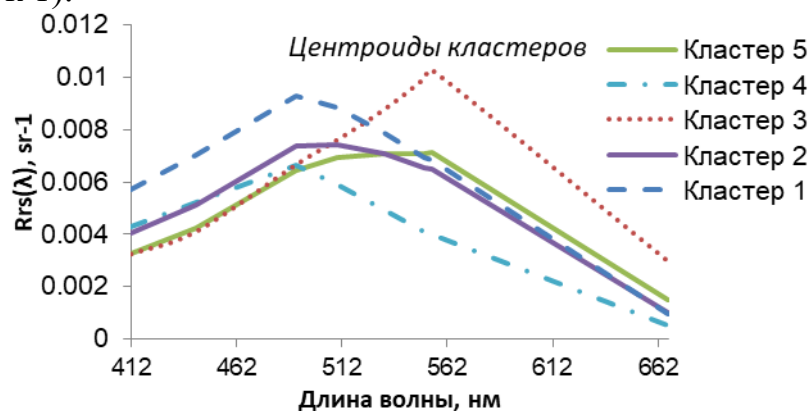


Рисунок 1 – Спектральный ход центроидов кластеров для массива среднедневных значений коэффициента яркости Черного моря по данным AERONET-OC с 2011 по 2022 год

Первый кластер содержал 130 значений, максимум спектрального коэффициента яркости моря находится на 490 нм, при анализе частотного месячного распределения данной моды, выявлен пик с мая по август. Предположительно, данные значения соответствуют цветению кокколитофорид. Во втором кластере содержались 183 значения, максимум $Rrs(\lambda)$ обнаружен на 500 нм. Мода с одинаковой частотой наблюдается в течение всего года. Третий кластер (164 значения) представляет собой очень мутные воды, так как максимум длины волны находится на 565 нм. Мода превалирует в весенне-летний период. Коэффициенты яркости моря низкие в коротковолновой области спектра и очень высокие в зеленой части видимой области, предположительно, это связано с цветениями или при большой концентрации минеральной взвеси (песок, глина). Четвертый кластер содержит 135 значений, максимум $Rrs(\lambda)$ отмечается на 490 нм, значения спектрального коэффициента яркости близки к значениям в центральной части Черного моря, полученным в ходе экспедиционных данных. Пятый кластер состоит из 219 значений, максимум отмечен на 540 нм (мутные воды).

Далее по результатам кластерного анализа был проведен расчет комбинаций индексов цвета (*CI*), используемых в алгоритмах Ocean Color для нахождения концентрации хлорофилла-*a* (O'Reilly et al, 1998) (см. таблица 2). Обнаружено, что отношение спектрального коэффициента яркости на 412 нм и 443 нм $CI(412/443)$ слабо изменчиво для западной части Черного моря и варьируется в пределах

$0,80 \pm 0,07$. Для проверки данной закономерности были использованы независимые измерения коэффициента яркости моря, полученные в ходе 116 рейса НИС «Проф. Водяницкий» с апреля по май 2021 года, охватывающие центральную и восточную части Черного моря. Расчеты отношений $CI(412/443)$ для всех 90 спектров дали значение $0,80 \pm 0,03$. В дальнейшем это служило опорной информацией при разработке регионального алгоритма дополнительной коррекции при наличии пылевого аэрозоля.

Таблица 2 – Средние значения комбинаций CI для различных кластеров по станциям AERONET-OC (Galata, Gloria)

	$CI(412/443)$	$CI(443/547)$	$CI(443/488)$	$CI(443/555)$
Кластер 1	$0,811 \pm 0,054$	$1,012 \pm 0,085$	$0,758 \pm 0,048$	$1,026 \pm 0,088$
Кластер 2	$0,791 \pm 0,077$	$0,782 \pm 0,079$	$0,695 \pm 0,059$	$0,78 \pm 0,082$
Кластер 3	$0,809 \pm 0,108$	$0,413 \pm 0,067$	$0,618 \pm 0,057$	$0,400 \pm 0,068$
Кластер 4	$0,833 \pm 0,049$	$1,265 \pm 0,166$	$0,785 \pm 0,044$	$1,29 \pm 0,178$
Кластер 5	$0,794 \pm 0,082$	$0,595 \pm 0,068$	$0,655 \pm 0,060$	$0,590 \pm 0,382$
ОБЩЕЕ	$0,808 \pm 0,07$	$0,813 \pm 0,355$	$0,702 \pm 0,09$	$0,820 \pm 0,377$

В заключение раздела 3 приводятся выводы.

Раздел рассматривает *in situ* измерения по данным платформ AERONET-OC для спектрального коэффициента яркости Черного моря. Наличие значений $Rrs(\lambda)$, которые плохо согласуются со стандартными оптическими моделями, свидетельствует о необходимости применения аналогичной проверки в других исследовательских задачах, где используются данные AERONET-OC. Подраздел 3.2 посвящен анализу изменчивости спектрального коэффициента яркости при различных внешних условиях. В качестве метода исследования, предложено использование автоматизированной кластеризации. Показано, что индекс цвета $CI(412/443)$ слабо изменчив для западной части Черного моря и варьируется в пределах $0,80 \pm 0,07$, в то время как другие комбинации CI сопровождаются большим среднеквадратичным отклонением.

В Четвертом разделе (31 с.) представлен и описан сам алгоритм дополнительной коррекции спутниковых значений коэффициента яркости моря при наличии пыли с теоретическим и экспериментальным обоснованием.

В подразделе 4.1 содержится теоретическая основа работы алгоритма. Для описания влияния пылевого аэрозоля на перенос излучения использовался принцип взаимодействия, который работает с коэффициентами пропускания (T) и коэффициентами отражения плоскопараллельного слоя (R) (Preisendorfer, 1976).

$$R, T = \frac{\pi \cdot L}{\mu_0 F_0},$$

где L – интенсивность рассеянного света;

μ_0 – косинус зенитного угла Солнца.

Предположим, что к слою с отражением R_1 добавляется оптически тонкий слой с отражением R_2 . В случае, когда второй слой оптически тонкий, нет необходимости

учитывать переотражение между слоями. Для приближенной оценки запишем суммарное отражение R в скалярной форме (формула 2)

$$R = R_1 + T^u T^d R_2. \quad (2)$$

где R_1 — отражение от первого слоя;

R_2 — отражение от второго слоя;

T^u — пропускание с направлением распространения излучения вверх;

T^d — пропускание с направлением распространения излучения вниз.

Поскольку второй слой тонкий, для коэффициента отражения существует аналитическое выражение

$$R_2 = \frac{p(\cos \gamma) b(z) dz}{4\mu \mu_0}, \quad (3)$$

где $b(z)$ — суммарный показатель рассеяния на глубине z ;

$p(z, \cos \gamma)$ — индикатриса рассеяния, зависящая от угла рассеяния

$$\cos \gamma = -\mu_1 \cdot \mu_2 + \sqrt{1 - \mu_1^2} \sqrt{1 - \mu_2^2} \cos \varphi.$$

μ — косинус зенитного угла наблюдения.

Подставляя (3) в выражение (2), получаем аналитические выражения для функций пропускания

$$\frac{dR}{dz} = T^u(z) \cdot T^d(z) \cdot \frac{p(\cos \gamma) \cdot b(z)}{4\mu_0 \mu}. \quad (4)$$

В функциях пропускания предлагается учитывать только поглощение, тогда вводя вертикальный профиль аэрозольного поглощения $a(z)$ как

$$a(z) = \frac{d\tau_a(z)}{dz} \cdot (1 - \Lambda(z))$$

где $\tau_a(z)$ — оптическая толщина аэрозоля от верхней границы атмосферы до глубины z ,

$\Lambda(z)$ — альбедо однократного рассеяния.

Можно найти явные выражения для функций пропускания в виде интегралов от $a(z)$

$$T^u(z) = \exp \left[-\frac{1}{\mu} \int_0^z a(x) dx \right], \quad T^d(z) = \exp \left[-\frac{1}{\mu_0} \int_0^z a(x) dx \right]. \quad (5)$$

Далее, подставляя выражения (5) в дифференциальное уравнение (4) получаем

$$\frac{dR}{dz} = \frac{p_m(\cos\gamma) \cdot b_m(z)}{4\mu_0\mu} \exp\left[-\left(\frac{1}{\mu_0} + \frac{1}{\mu}\right) \cdot \int_0^z a(x)dx\right] + \frac{p_a(\cos\gamma) \cdot b_a(z)}{4\mu_0\mu} \exp\left[-\left(\frac{1}{\mu_0} + \frac{1}{\mu}\right) \cdot \int_0^z a(x)dx\right] \quad (6)$$

где нижние индексы m, a — относятся к молекулярному и аэрозольному рассеянию соответственно.

Второе слагаемое выражения (6) относится только к оптическим свойствам аэрозоля и формально может рассматриваться как часть модели аэрозоля, выбор которой основывается на величинах сигнала в ближнем ИК диапазоне. Первое слагаемое описывает уменьшение вклада молекулярного рассеяния и, поэтому, заметно влияет на погрешность атмосферной коррекции в коротковолновой части видимого диапазона. Следовательно, ошибку атмосферной коррекции можно записать в виде

$$r = \frac{p_m(\cos\gamma)}{4\mu_0\mu} \left(\frac{1}{\mu_0} + \frac{1}{\mu}\right) \tau_m^0(\lambda) a_0(\lambda) \int_0^1 \int_0^z g(x) dx \cdot dz, \quad (7)$$

где $a_0(\lambda) = (1 - \Lambda(\lambda))\tau_a^0$ — оптическая толщина аэрозольного поглощения;

$g(x)$ — профиль аэрозоля, учет стратификации;

$\tau_m^0(\lambda)$ — оптическая толщина молекулярной атмосферы.

В формуле (7) множитель $\frac{p_m(\cos\gamma)}{4\mu_0\mu} \left(\frac{1}{\mu_0} + \frac{1}{\mu}\right)$ (геометрия наблюдения) и двойной интеграл, который учитывает стратификацию пылевого аэрозоля относительно молекул воздуха, не зависят от длины волны. Множитель $a_0(\lambda)$, учитывающий поглощающие свойства аэрозоля, слабо зависит от λ , так как $(1 - \Lambda(\lambda)) \ll 1$. Поэтому спектральные свойства ошибки атмосферной коррекции описываются в основном сомножителем $\tau_m^0(\lambda)$. По закону Рэлея известно, что $\tau_m^0 \approx \lambda^{-4}$. Поэтому при поглощающем аэрозоле ошибка атмосферной коррекции описывается спектральным ходом молекулярного рассеяния.

В подразделе 4.2 рассмотрен спектральный ход ошибки атмосферной коррекции по спутниковым данным $Rrs(\lambda)$, при условии наличия пылевого аэрозоля в атмосфере. Для анализа изменчивости $Rrs(\lambda)$, был использован метод главных компонент (PCA) с оценкой вклада первого собственного вектора матрицы ковариации. 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 Черного моря к центральной его части или в случае пространственных неоднородностей яркости (цветения). В данной задаче входными данными к PCA служила разница между *in situ* измерениями коэффициента яркости моря и спутникового ($Rrs(AERONET-OC) - Rrs(MODIS)$). Результаты ковариационного анализа сравнения спутниковых и натурных измерений для Черного моря по измерениям MODIS Aqua при наличии пыли (49

спутниковых снимков) и при наличии чистой атмосферы (133 спутниковых снимка) представлены на рисунке 2.

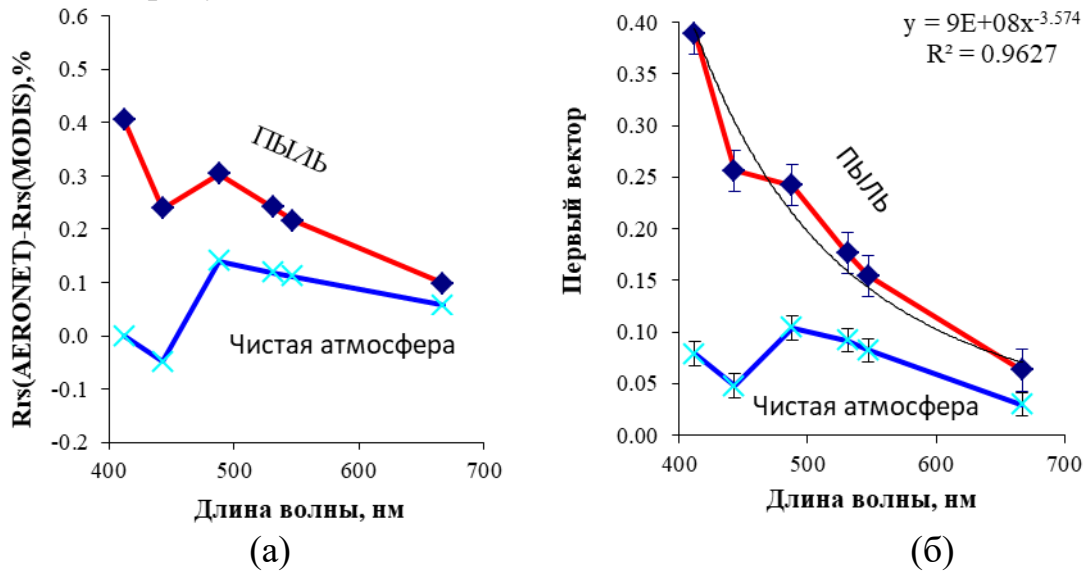


Рисунок 2 – Результаты PCA анализа. Показаны: (а) абсолютная погрешность $Rrs(\lambda)$ между спутниковыми значениями MODIS Aqua и натурными измерениями AERONET для Черного моря; (б) первый собственный вектор

Из рисунка 2 видно, что при наличии пылевого аэрозоля наблюдается следующая закономерность: спектральный ход первого собственного вектора имеет вид степенной функции. Далее проводилась аппроксимация первого собственного вектора, где получена зависимость вида $y = 9 \cdot 10^8 \lambda^{-3.574}$, которая близка к функции λ^{-4} .

В подразделе 4.3 рассматривается работа предложенного алгоритма для восстановления коэффициента яркости моря при наличии пыли. Для спутниковых данных спектрального коэффициента яркости моря, предлагается дополнительная коррекция данных *level 2*, предоставляемых *Ocean Color* для Черного моря. Модельные (восстановленные) значения спектрального коэффициента яркости вычисляться по формуле

$$Rrs_m(\lambda) = Rrs_{sat}(\lambda) + k \cdot \lambda^{-4}, \quad (8)$$

где $Rrs_{sat}(\lambda)$ – значение спектрального коэффициента яркости, полученное методами дистанционного зондирования на длине волны λ ;

k – поправочный коэффициент, определяемый из условия постоянства индекса цвета (подраздел 3.2) и вычисляемый по следующей формуле

$$k = \frac{CI\left(\frac{412}{443}\right)Rrs_{sat}(443) - Rrs_{sat}(412)}{(412^{-4} - CI\left(\frac{412}{443}\right)443^{-4})}, \quad (9)$$

где $CI(412/443) = 0,8$ (подраздел 3.2).

Таким образом, считая k постоянной величиной в каждом отдельно рассматриваемом случае, по формуле (8) рассчитываем модельные значения спектрального коэффициента яркости моря на 443, 488, 531, 547, 555 и 667 нм. Для каждых измерений спутниковых $Rrs(\lambda)$ по вышеизложенной методике были рассчитаны модельные значения коэффициента яркости. Далее проводился регрессионный анализ всех результатов с вычислением коэффициента корреляции с модельной поправкой и без нее, без наличия пыли (рисунок 3).

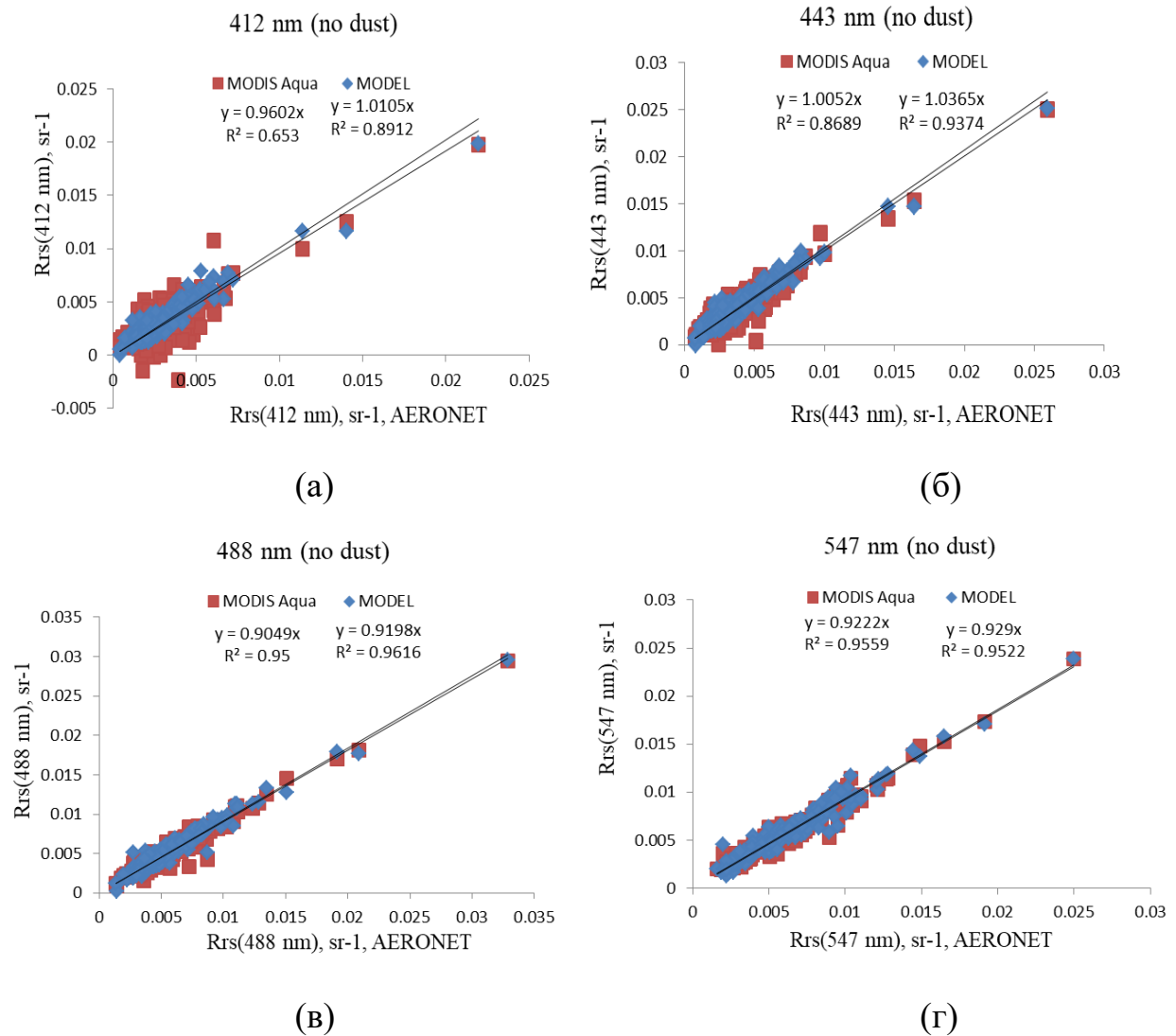


Рисунок 3— Линейная регрессия $Rrs(\lambda)$ между значениями спутника MODIS и измерениями AERONET-OC *in situ*, а также модельными значениями для западной части Черного моря на 412 нм (а), 443 нм (б), 488 нм (в), 547 нм (г) для всех случаев, когда пыль не обнаружена

Исходя из рисунка 3 видно, что даже без наличия пылевого аэрозоля данный алгоритм повышает корреляцию данных на 412–488 нм, с повышением коэффициента пропорциональности, что свидетельствует о положительном результате работы алгоритма. Так же полученные регрессии доказывают, что новый

алгоритм не искажает качественные спутниковые данные. Особый интерес представляют случаи наличия поглощающего аэрозоля; далее будет рассмотрено 49 случаев наличия пыли над акваторией Черного моря с проведением аналогичного регрессионного анализа (рисунок 4).

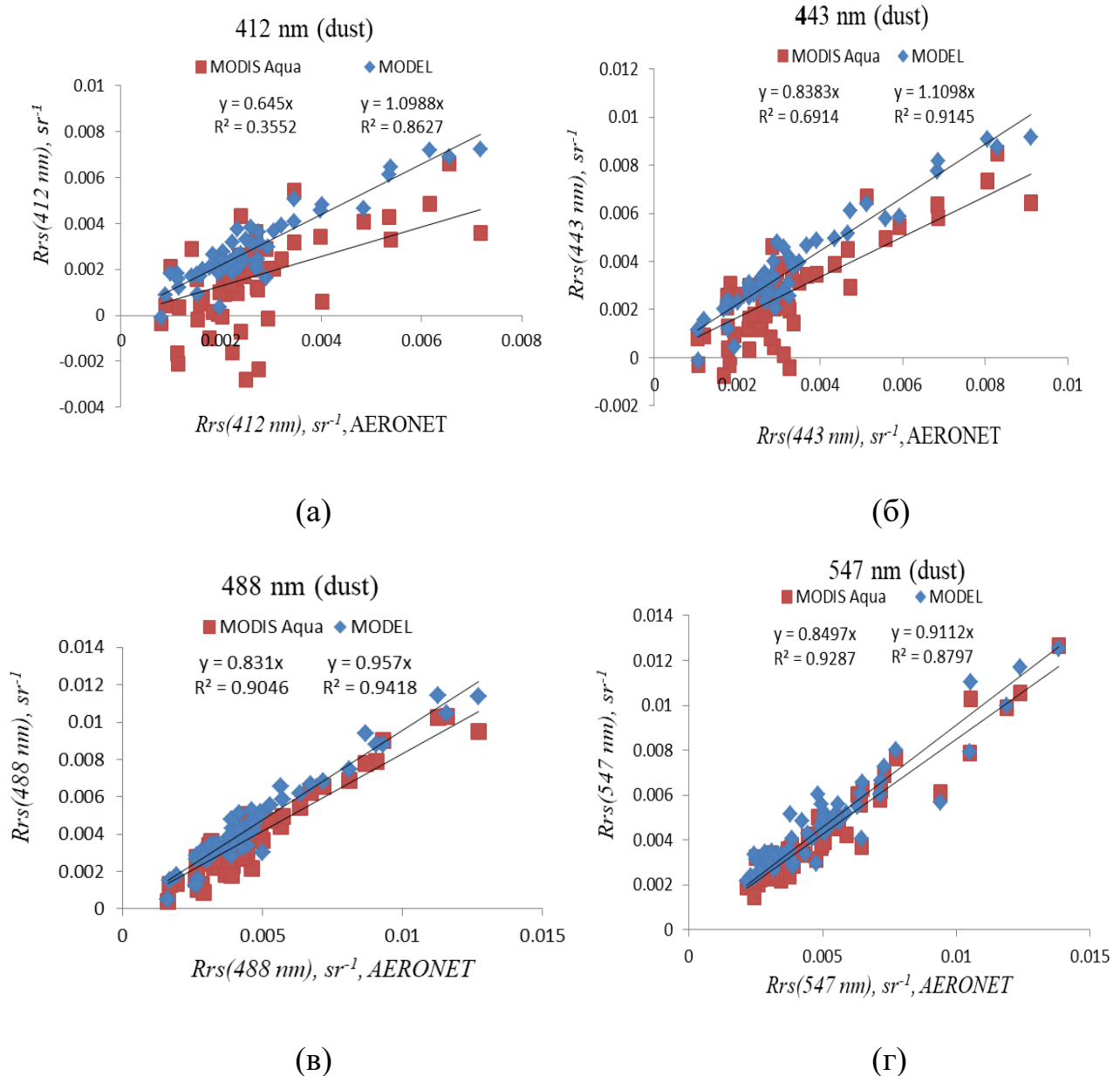


Рисунок 4— Линейная регрессия $Rrs(\lambda)$ между значениями спутника MODIS и измерениями AERONET-OC *in situ*, а также модельными значениями для западной части Черного моря на 412 нм (а), 443 нм (б), 488 нм (в), 547 нм (г) для всех случаев, идентификации пылевого аэрозоля

Как продемонстрировано на рисунке 4, в случаях наличия пылевого аэрозоля предложенная модель повышает R^2 более чем в 2 раза на 412 нм, также ощутима разница на 443 нм. В зеленом диапазоне 531–555 нм изменения незначительны, коэффициент корреляции наоборот несколько занижается, но с сопутствующим

увеличением коэффициента пропорциональности. Следовательно, данный алгоритм с большой достоверностью восстанавливает спутниковые значения в дни пылевого переноса над Черноморским регионом. Разработанная модельная поправка может оказать значительное влияние на расчет индексов цвета, используемых в алгоритмах Ocean Color для нахождения концентрации хлорофилла-*a*. В разделе 4.3 было показано, что модельные значения лучше согласуются с *in situ* данными и, если без коррекции корреляция составляла 18% (отсутствовала), при ее учете 80% (высокая).

В подразделе 4.4 проверяется работа предложенного алгоритма на независимых натурных измерениях коэффициента яркости моря с 116го рейса НИС «Проф. Водяницкий». Для каждого натурного измерения были найдены синхронные пары (выполненные в тот же самый день) для спутникового продукта $Rrs(\lambda)$ (MODIS Aqua). Для иллюстрации работы нового алгоритма было выбрано несколько синхронных пар, которые обладали следующими свойствами: 1) имели разные значения спутниковых AOT на 869 нм в диапазоне от 0,05 до 0,25; 2) отношение $Rrs(412): Rrs(443)$ были существенно ниже, чем 0,76. Следовательно, с учетом модельной поправки получены следующие спектры (рисунок 5).

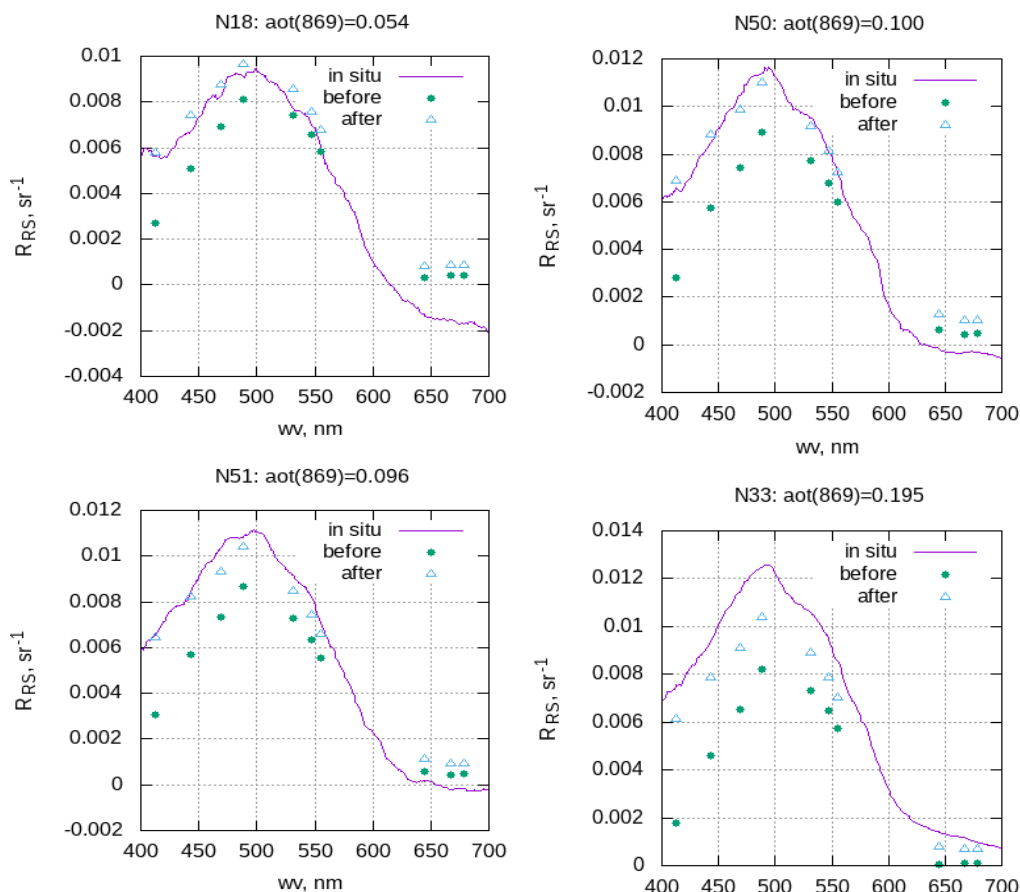


Рисунок 5 – Сравнение измерения *in situ* (сплошная линия) со спутниковым продуктом $Rrs(\lambda)$ до (before) и после (after) поправки для рассматриваемых пар

Из рисунка 5 видно, что после введения модельной поправки спектр $Rrs(\lambda)$ становится ближе к реально измеренному спектру, следовательно, методика учета ошибок стандартной атмосферной коррекции успешно работает.

Выводы к Разделу 4

Для разработки алгоритма дополнительной коррекции необходимо было доказать, что пылевой аэрозоль влияет на величину ошибки атмосферной коррекции. В подразделе 4.1 показано, что при поглощающем аэрозоле погрешность атмосферной коррекции, выражается степенной функцией четвертой степени, т.е. близка к λ^{-4} . Это связано с поглощением аэрозольной компоненты молекулярной составляющей. Аналитические выводы, подтвердились при валидации спутниковых и натурных измерений. На основании этого была предложена простая модель, где восстановленные значения спектрального коэффициента яркости могут быть вычислены по формуле (8). Новая модель, основана на предположении о малой вариативности индекса цвета (CI) на 412 и 443 нм (показано в подразделе 3.2). Таким образом, после коррекции модельные значения спектрального коэффициента яркости имеют лучшую согласованность с натурными значениями, чем спутниковые $Rrs(\lambda)$ на level 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Главной целью диссертационной работы стало исследование влияния поглощающего аэрозоля на величину спутникового коэффициента яркости моря и разработка модельной поправки для улучшения результатов. Актуальность настоящей задачи обоснована тем, что при использовании современных алгоритмов экстраполяции (Гордон и Ванг) наблюдается рост ошибок при уменьшении длины волны. Данное свойство стандартных алгоритмов объясняется неточным описанием вклада мелкодисперсной фракции аэрозольных частиц в радиацию, рассеянную атмосферой. Это означает, что используемые алгоритмы даже при условии чистой атмосферы могут давать большие погрешности. При наличии пылевого аэрозоля ошибки становятся более явными, появляются отрицательные значения в коротковолновой области спектра. С привязкой к коэффициенту яркости в коротковолновой области можно построить новый алгоритм для устранения влияния атмосферы методами интерполяции.

Для решения поставленных задач диссертационного исследования использовались инструменты дистанционного зондирования (MODIS-Aqua), источники натурных измерений спектрального коэффициента яркости моря для Черного моря (AERONET-OC), а также набор оптических характеристик атмосферы из сети AERONET, таких как аэрозольная оптическая толщина, параметр Ангстрем, альбеда однократного рассеяния (AERONET).

Проводился анализ изменчивости *in situ* измерений яркости моря по данным AERONET-OC в западной части Черного моря. В данной работе впервые предложено использование критерия надежности величин спектрального коэффициента яркости для данных AERONET-OC, который необходим для повышения точности процедуры валидации спутниковых и натурных измерений. С использованием трехпараметрической модели, описанной в подразделе 1.3, обнаружено, что 13% данных имеют явные расхождения. Эти данные были исключены из дальнейшего анализа.

В третьем разделе показано, что индекс цвета $CI(412/443)$ слабо изменчив для западной части Черного моря и варьируется в пределах $0,80 \pm 0,07$, это было подтверждено не только данными со станций AERONET-OC, но и экспедиционными данными с 116го рейса НИС «Проф. Водяницкий». Для других комбинаций набора длин волн, среднее квадратичное отклонение превышало 20%. Данная закономерность служит опорной информацией при разработке регионального алгоритма дополнительной коррекции при наличии пылевого аэрозоля.

В качестве основы алгоритма дополнительной коррекции были предоставлены теоретические выкладки для учета стратификации аэрозоля в уравнении переноса. В подразделе 4.1. показано, что при поглощающем аэрозоле погрешность атмосферной коррекции близка к λ^{-4} . Аналитические выводы, подтвердились при валидации спутниковых и натурных измерений. Для анализа изменчивости $Rrs(\lambda)$, был использован метод главных компонент (РСА) для отобранных дат с оценкой вклада первого собственного вектора матрицы ковариации. В данной задаче РСА учитывает не просто спектральный коэффициент яркости моря, а разницу натурального значения Rrs на длине волны λ нм и спутникового спектрального коэффициента яркости. В результате было найдено, что наибольшая разница присутствует в случае пылевого аэрозоля. При наличии пылевого аэрозоля наблюдается явная систематика, а именно при аппроксимации первого собственного вектора для MODIS-Aqua получено $y = 9 \cdot 10^8 \lambda^{-3,574}$. На основании этого была предложена простая модель, где восстановленные значения спектрального коэффициента яркости могут быть легко вычислены. Новая модель, основана на предположении о малой вариативности индекса цвета (CI) на 412 и 443 нм, что было показано в подразделе 3.2. Таким образом, модельные значения спектрального коэффициента яркости имели лучшую согласованность с натурными значениями, чем спутниковые $Rrs(\lambda)$. В случаях наличия пылевого аэрозоля разработанная модель повышает коэффициент детерминации R^2 между спутниковыми и натурными значениями $Rrs(\lambda)$ более чем в 2 раза на 412 нм. Также ощутима разница на 443 и 488 нм, в зеленом диапазоне 531–555 нм изменения незначительны. Рассчитанные по модельным значениям $Rrs(\lambda)$ индексы цвета, необходимые для корректного расчета $Chl-a$, так же лучше согласуются с данными AERONET-OC (возрастание корреляции на 60% на 412 нм). Улучшение результатов дополнительно подтверждено и независимыми натурными измерениями с 116го рейса НИС «Проф. Водяницкий», что детально рассмотрено в подразделе 4.4.

Разработанная методика в дальнейшем может быть использована и для других акваторий, подверженных влиянию поглощающих аэрозолей (пылевые регионы). Это могут быть другие платформы AERONET с расширением Ocean Color или другие акватории и, где *in situ* измерения имеют достаточное пространственно–временное покрытие. Большим преимуществом разработанного алгоритма является его простота в реализации, возможность использования даже при отсутствии пыли без искажения данных, а так же небольшой набор входных параметров.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ РАБОТЫ

Статьи в рецензируемых журналах

1. Kalinskaya D.V., Varenik A.V., **Papkova A.S.** Phosphorus and silicon as markers of dust aerosol transfer over the Black Sea region // *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. – 2018. – V. 15, № 3. – P. 217-225. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-217-225.
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 Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. – 2020. – V. 17, № 1. – P. 234-242. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-234-242.
3. Kalinskaya D.V., **Papkova A.S.**, Kabanov D.M. Research of the Aerosol Optical and Microphysical Characteristics of the Atmosphere over the Black Sea Region by the FIRMS System during the Forest Fires in 2018–2019 // *Physical Oceanography*. – 2020. – V. 27, № 5. – P. 514-524. DOI: 10.22449/1573-160X-2020-5-514-524.
4. Kalinskaya, D.V., **Papkova, A.S.**, Varenik, A.V. The case of absorbing aerosol anomalous transport over the Black Sea in the spring of 2020 // *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. – 2021. – V. 18, № 2. – P. 287-298. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-287-298.
5. **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, № 6. – P. 201. DOI: 10.3390/fluids6060201.
6. **Papkova A.S.**, Shybanov E.B. Influence of dust aerosol on the results of atmospheric correction of remote sensing reflection of the Black and Mediterranean Seas from MODIS satellite data // *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. – 2021. – V. 18, № 6. – P. 46–56. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-46-56.
7. Kalinskaya D.V., **Papkova A.S.** Why Is It Important to Consider Dust Aerosol in the Sevastopol and Black Sea Region during Remote Sensing Tasks? A Case Study // *Remote Sensing*. – 2022. – V.14, № 8. – P. № 1890. DOI: 10.3390/rs14081890.
8. Shybanov E.B. **Papkova A.S.** 2022. Algorithm for Additional Correction of Remote Sensing Reflectance in the Presence of Absorbing Aerosol: Case Study // *Physical Oceanography*. – 2022. – 29(6). – P. 688-706. DOI:10.22449/1573-160X-2022-6-688-706

Статьи в рецензируемых сборниках научных трудов

1. Kalinskaya, D.V., **Papkova, A.S.** Optical characteristics of atmospheric aerosol from satellite and photometric measurements at the dust transfers dates // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2020. T. 11560, C. № 115603S.
2. 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 // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2019. T.11208, C.112084R.

3. **Papkova A. S.**, Kalinskaya D. V., Shybanov E. B, "Atmospheric correction according to the MODIS and VIIRS satellite data with considering the atmospheric pollution factor by a combination of different types of aerosol," 2022. Proc. SPIE 12341, 28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 123414G.

4. **Papkova A.**, Papkova Y., Shukalo D. Modelling episode of Saharan dust transfer over the Black Sea according to the WRF model and MODIS satellite data E3S Web Conf., 285 (2021) 08004.

5. **Papkova, A.**, Papkov, S., Shukalo, D. Modelling the generation of dusty marine aerosol by expeditionary data and remote sensing methods over the Black Sea region // E3S Web of Conferences. 2020. T.224, C.№ 02031.

6. Kalinskaya, D.V., **Papkova, A.S.** Influence of dust transfers on aerosol asymmetry factor over the Black Sea region according to AERONET data // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 27th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics 2021 Moscow 5 July 2021 до 9 July 2021. 2021. T.11916, C.№ 1191645.

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Папковой Анны Станиславовны

Подписано к печати 28.12.2022 г. Формат бумаги 60×84 1/16
Объем 0,9 п.л. Заказ № 1180 Тираж 100 экз.

Напечатано в типографии «КУПОЛ»
299053
г. Севастополь, ул. Муссонная, 46
Тел.: +7 978 784 66 32
kupol.sevastopol@mail.ru