

На правах рукописи

Калинская Дарья Владимировна

**ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ НА БИООПТИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧЕРНОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ
И СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Специальность 1.6.17. Океанология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Севастополь – 2025

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

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук **Суслин Вячеслав Владимирович**

Официальные оппоненты:

Репина Ирина Анатольевна, доктор физико-математических наук, профессор РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, заместитель директора по научно-техническому развитию

Полюхов Алексей Андреевич, кандидат географических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», старший научный сотрудник кафедры метеорологии и климатологии

Ведущая организация:

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

Защита состоится 11 февраля 2026 г. в 14 ч 00 мин на заседании диссертационного совета 24.1.229.01 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 и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН» https://mhi-ras.ru/news/thesis_defense_20251120910.html.

Автореферат разослан 10 декабря 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.229.01
кандидат географических наук

Харитоновна Людмила Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

Аэрозольная компонента атмосферы влияет на многие физико-химические процессы на поверхности Земли (Лившиц, 1973; Мак-Картни, 1979; Кондратьев, 1983; Смеркалов, 1997; Голобокова, 2009). В ходе циклического обмена между системами «океан – атмосфера» и «суша – атмосфера» взвеси поступают в атмосферу и удаляются из нее вместе с сухими и влажными осадками (Добровольский, 2009; Кондратьев, 2004; Шевченко и др., 2007). Атмосфера является одним из путей транспортировки различных природных и антропогенных веществ в океаны, моря и внутренние водоемы (Duce, et al., 1991; Jickells, 1995). Из атмосферного аэрозоля может происходить интенсивное осаждение микроэлементов в водоемы, что создает благоприятные условия для повышения их биопродуктивности (Migon, Sandroni, 1999; Griffin, Kellogg, 2004; Middleton, Kang, 2017; Вареник и др., 2019; Орехова, 2021). Так аэрозоль может быть источником питательных веществ, стимулирующих рост фитопланктона (Вареник, и др., 2016; Баранов, и др., 2020; Кульчин, и др., 2020; Werdell, et al., 2019). Важным является определение типа содержащегося в атмосфере аэрозоля, так как от этого зависит какие биогенные вещества могут попасть в верхний слой водоема в результате процесса осаждения и каков будет отклик экосистемы (Pulido-Villena, et al., 2008; Фишер, 1968).

Изучение взаимодействия атмосферного аэрозоля с прямым и рассеянным солнечным излучением является традиционной и развивающейся задачей оптики аэрозолей и физики атмосферы (Розенберг, 1942; Розенберг, 1965; Розенберг, и др., 1965; Розенберг, 1982; Сушкевич, 1966; Ивлев, Андреев, 1986; Толкаченко, и др., 2012; Суетин, и др., 2018). Важным представляется исследование временной изменчивости аэрозольной оптической толщины (АОТ) атмосферы – одного из основных факторов, характеризующих рассеивающий и поглощающий эффекты солнечной радиации в атмосфере (Иванов, 1979; Кондратьев и др., 1983; Зуев и др., 1986; Dubovik, et al., 2002; Суковатов, 2009; Сакерин и др. 2004; Сакерин и др. 2006; Сакерин и др. 2012). Актуальной проблемой дистанционного зондирования Земли считается получение корректной оценки вклада аэрозольной составляющей в суммарную яркость над внутренними водоемами (Suetin, et al., 2008; Копелевич, и др., 2018; Копелевич, и др., 2020).

Систематические наблюдения за спектральной прозрачностью атмосферы над Черным морем активно проводились в период с 1967 по 1977 гг. на основе измерений спектрального ослабления солнечного света на метеорологической обсерватории в Карадаге вблизи Феодосии (Гущин, 1988). К этому времени уже имелись некоторые сведения о характере колебаний прозрачности атмосферы и их связи с суточным ритмом и вариациями метеорологических полей (влажностью, температурой, радиацией и др.), возникающими вследствие вращения Земли (Гущин, 1988; Яковлева, Толкаченко, 2008). Новый этап исследований атмосферы над Черным морем начался с конца 90-х годов XX в., когда были запущены специализированные спутники (SeaWiFS, MODIS, VIIRS, OLCI и др.) и появилась сеть автоматизированных фотометров AERONET. Для

Черного моря влияние атмосферного аэрозоля на его биооптические характеристики до сих пор является слабоизученным вопросом. Результаты настоящего исследования в определенной степени восполняют этот пробел.

Цели и задачи исследования. Целью данного исследования является оценка влияния различных типов атмосферных аэрозолей на пространственно-временное распределение биооптических характеристик верхнего слоя вод Черного моря.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1) Определить основные оптические характеристики (АОТ, α и распределение частиц по размерам) фонового, пылевого и дымового аэрозоля по фотометрическим измерениям.

2) Для определения географического положения источников аэрозоля для акватории Черного моря разработать способ интерпретации данных об обратных траекториях переноса воздушных потоков.

3) Используя данные натурных наблюдений установить связь между переносом пылевого и дымового аэрозоля и концентрацией содержащихся в них микроэлементов.

4) Оценить изменчивость биооптических характеристик верхнего слоя вод в зависимости от особенностей осаждения пылевого и дымового аэрозоля на основе данных спутниковых измерений и результатов численных расчетов.

Методология и методы исследования. Основным методологическим подходом выполненного диссертационного исследования является комплексный анализ данных различных источников, включающий в себя:

- результаты натурных измерений фотометрами CIMEL-318 и SPM;
- спутниковые измерения приборами MODIS, VIIRS, OLCI, CALIPSO;
- результаты расчета обратных траекторий переноса воздушных потоков по данным моделирования AERONET и HYSPLIT;
- результаты сопоставления данных по атмосферным осадкам, содержащим повышенные концентрации микроэлементов, с данными оптических характеристик аэрозоля над черноморским регионом и поверхностного слоя вод;
- подспутниковые экспедиционные измерения на станциях международной сети AERONET, с борта НИС «Профессор Водяницкий», на океанографической платформе ФГБУН ФИЦ МГИ и береговой зоне Черноморского побережья фотометром SPM.

В процессе исследований использовались статистические методы обработки данных и стандартные пакеты обработки спутниковых изображений.

Научная новизна полученных результатов. Впервые получены основные оптические характеристики фонового, пылевого и дымового аэрозоля над Черным морем по натурным измерениям, проведенным фотометрами CIMEL-318 (сеть станций AERONET) и SPM в Севастополе, на ЮБК, на океанографической платформе в поселке Кацивели и с борта НИС «Профессор Водяницкий».

Впервые разработан алгоритм определения источников переносимого аэрозоля для региона Черного моря на основе интерпретации результатов

моделирования обратных траекторий перемещения воздушных потоков по данным AERONET и HYSPLIT.

Впервые получены оценки количества случаев переноса пылевого аэрозоля из районов Сахары и Ближнего Востока в регион Черного моря на основе предложенного алгоритма интерпретации результатов моделирования обратных траекторий перемещения воздушных потоков по данным AERONET и HYSPLIT.

Впервые показано влияние присутствия пылевого аэрозоля на результаты определения основных оптических характеристик поверхностного слоя вод Черного моря по данным различных спутников.

Впервые получена оценка временного сдвига отклика экосистемы открытой части Черного моря на осаждение на поверхностный слой вод фосфатов (PO_4^{3-}), силикатов (SiO_3^{2-}) и неорганических форм азота (NO_2 , NO_3 , NH_4), содержащихся в аэрозоле.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты, приведенные в работе соискателя, уточняют представление о влиянии аэрозоля на определяемые дистанционными методами величины аэрозольной оптической толщины, значения параметра Ангстрема и распределение частиц по размерам, а также на величины оптических характеристик поверхностного слоя Черного моря, такие как коэффициент яркости моря, концентрация хлорофилла-а и температура. В диссертации сделан дальнейший шаг в понимании влияния аэрозоля на интенсивность цветения фитопланктона и биопродуктивность верхнего слоя вод, а именно показано, что выпадение пылевого аэрозоля приводит к временному росту концентрации хлорофилла-а в поверхностном слое вод Черного моря и, как следствие, к росту показателя поглощения света пигментами фитопланктона.

Результаты натурных измерений оптических характеристик атмосферного аэрозоля совместно с анализом проб, собранных осадкосборником в пгт Кацивели, позволяют определить биогенные вещества, которые влияют на процессы, происходящие в поверхностном слое вод моря.

Полученные данные могут быть использованы для более точной параметризации основных оптических характеристик атмосферного аэрозоля при моделировании биогеохимических процессов, происходящих в поверхностном слое Черного моря.

Положения, выносимые на защиту:

1) Для регионов акватории Черного моря приведены оптические характеристики пылевого и дымового аэрозоля (величины значений аэрозольной оптической толщины (AOT), параметра Ангстрема (α), распределение частиц по размерам).

2) Алгоритм определения источников пылевого и дымового аэрозоля по результатам статистического анализа событий переноса пыли в регион Черного моря по данным моделирования AERONET и HYSPLIT.

3) Результаты корреляционного анализа между оптическими характеристиками пылевого и дымового аэрозоля и количественным и

качественным составом микроэлементов в атмосферных осадках, которые содержат высокие концентрации фосфатов, силикатов и азота.

4) Оценка изменчивости биооптических характеристик поверхностного слоя вод Черного моря под влиянием биогенных веществ (PO_4^{3-} , SiO_3^{2-} , NO_2 , NO_3 , NH_4), осажденных из пылевого аэрозоля по данным наземных и спутниковых измерений.

Степень достоверности результатов проведенных исследований определяется следующими факторами:

- использованием методов и методик, являющихся общепринятыми в области исследования атмосферы, оптики и биогеохимии моря, при проведении измерений в сертифицированной лаборатории;

- обеспечением повышения точности измерений оптических свойств атмосферного аэрозоля за счет калибровки солнечных фотометров сети AERONET и SPM и валидации их измерений по спутниковым наблюдениям;

- анализом статистически обеспеченного массива данных натурных фотометрических измерений аэрозольной оптической толщины, параметра Ангстрема и распределения частиц по размерам;

- валидацией спутниковых данных и моделей первичной продукции и проверкой их соответствия *in situ* измерениям;

- публикацией в ведущих профильных рецензируемых российских и международных журналах.

Связь с научными программами, планами, темами. Работа выполнена в соответствии с научными планами и программами исследований Морского гидрофизического института НАН Украины (2005–2014) и Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН» (2014–2022), а также в рамках научно-исследовательских проектов РФФИ (№14-45-01049, №16-35-00179, №17-05-00113, №19-05-00140, №19-05-50023).

Апробация результатов исследования. Основные результаты настоящей диссертации были представлены на заседаниях Ученого совета Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН), Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН и ФГБУН ФИЦ МГИ. Основные результаты диссертации представлялись на международных и всероссийских конференциях, семинарах и школах: Международная молодежная научная конференция «Современные проблемы рационального природопользования в прибрежных морских акваториях Украины» (Крым, пгт Кацивели, 2007 г.); Международная научная конференция студентов и аспирантов «География, Геоэкология, Геология: опыт научных исследований» (г. Днепропетровск, ДНУ, 2007 г.); VIII Харьковская конференция молодых ученых «Радиофизика и Электроника, Биофизика» (г. Харьков, 2008 г.); 12 Международная конференция «Математические методы в электромагнитной теории» (г. Одесса, 2008 г.); Всеукраинская конференция «Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки» (г. Киев, 2008 г.); IV–X Международная конференция «Современные проблемы оптики естественных вод (Optics of natural waters)» (г. Санкт-Петербург, 2007–2019 гг., 2024 г.); Международная научная конференция «Интегрированная система

мониторинга Черного и Азовского морей» (г. Севастополь, 2013 г.); IX Всероссийская научная конференция молодых ученых «Понт Эвксинский» (г. Севастополь, 2015 г.); Первая всероссийская молодежная научная конференция «Комплексные исследования морей России: оперативная океанография и экспедиционные исследования» (г. Севастополь, 2016 г.); Всероссийская научная конференция молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана», (г. Москва, 2017 г., г. Санкт-Петербург, 2018 г., г. Севастополь, 2019 г.); Международный Симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (г. Томск, 2016 и 2018 гг., г. Иркутск, 2017 г., г. Новосибирск, 2019 г., г. Санкт-Петербург, 2024 г.); XII Международная Школа молодых ученых «Физика окружающей среды» им. А.Г. Колесника (г. Томск, 2016 г.); Научная конференция «Мировой океан: модели, данные и оперативная океанология», (г. Севастополь, 2016 г.); Всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (г. Москва, 2016–2019 гг.); Рабочая группа «Аэрозоли Сибири», (г. Томск, 2016, 2018 гг.); XXV Международная техническая конференция «Прикладные задачи математики» (г. Севастополь, 2017 г.); Всероссийская научная конференция «Моря России: наука, безопасность, ресурсы» (г. Севастополь, 2017, 2018, 2019, 2020 гг.).

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано в соавторстве 76 научных работ, из них 20 статей в рецензируемых научных журналах, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ и 55 работ в сборниках научных трудов, материалов и тезисов докладов на всероссийских и международных научных конференциях.

Требованиям ВАК при Минобрнауки России удовлетворяют 16 работ в рецензируемых научных изданиях [1–16] и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [17]. В их числе 9 работ в рецензируемых научных изданиях, входящих в наукометрическую базу Web of Science [8–16], 11 работ в изданиях, входящих в наукометрическую базу SCOPUS [6–16], 3 работы [2, 3, 5] в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень изданий ВАК при Минобрнауки России, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук и 2 работы [1, 4] в изданиях, соответствующих п. 10 Постановления Правительства Российской Федерации от 30 июля 2014 г. №723 «Об особенностях присуждения ученых степеней и присвоения ученых званий лицам, признанным гражданами Российской Федерации в связи с принятием в Российскую Федерацию Республики Крым и образованием в составе Российской Федерации новых субъектов – Республики Крым и города федерального значения Севастополя».

Личный вклад соискателя. Планирование, анализ и обсуждение результатов исследовательской работы проводились соискателем совместно с научным руководителем и соавторами научных публикаций.

Диссертантом лично выполнены натурные измерения ослабления прямого солнечного излучения портативным фотометром SPM. По полученным спутниковым и модельным данным, а также по измерениям фотометров

CIMEL-318 и SPM сети AERONET для региона Черного моря определены оптические характеристики фонового, пылевого и дымового аэрозоля над Черным морем.

Соискателем проведено сопоставление оптических характеристик аэрозоля с величинами концентраций биогенных веществ в пробах атмосферных осадков, отобранных Вареник А.В. в период переносов над Черным морем пыли со стороны пустынь и дыма от пожаров.

Д.В. Калининской совместно с научным руководителем представлен алгоритм интерпретации результатов моделирования обратных траекторий перемещения воздушных потоков, находящихся в открытом доступе на платформах AERONET (Архив AERONET <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/BAMGOMAS/index.html>) и HYSPLIT (Архив HYSPLIT <https://www.ready.noaa.gov/index.php>), для определения географического положения источников аэрозоля на примере Черного моря. По представленному алгоритму соискателем было вычислено количество случаев переноса пылевого аэрозоля из районов Сахары и Сирии в регион Черного моря, что позволило определить периоды наибольшего влияния пыли на оптические свойства вод, определяемых методами дистанционного зондирования.

Совместно с соавторами для открытой части Черного моря диссертантом выполнены оценки временного сдвига отклика экосистемы на осаждение биогенных веществ, содержащихся в пылевом аэрозоле.

Благодарности. Автор выражает благодарность своему научному руководителю – кандидату физико-математических наук, заведующему отделом динамики океанических процессов Суслину Вячеславу Владимировичу за внимательное руководство работой, за помощь и полезные идеи, соавторство в статьях по теме диссертации, советы и комментарии в течение всего периода написания работы. Особая благодарность доктору физико-математических наук, профессору, заведующему отделом оптики и биофизики моря Ли Михаилу Ен-Гон и доктору физико-математических наук Шибанову Евгению Борисовичу. Автор благодарит кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника отдела оптики и биофизики моря Корчемкину Елену Николаевну за совместные измерения и определение оптических характеристик для акватории Черного моря. Соискатель выражает благодарность коллегам из Лаборатории оптики аэрозоля Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, а именно: доктору физико-математических наук, главному научному сотруднику Сакерину Сергею Михайловичу и кандидату физико-математических наук, старшему научному сотруднику Кабанову Дмитрию Михайловичу за предоставление аппаратуры и соавторство в статьях по измерениям, осуществляемым посредством фотометра SPM. Диссертант благодарит кандидата географических наук, старшего научного сотрудника отдела биогеохимии моря Вареник Аллу Валерьевну за помощь в исследованиях с использованием геохимических данных проб осадков и оперативную их обработку. Автор благодарит своих коллег: коллектив отдела оптики и биофизики моря за помощь в исследованиях и проведении натурных измерений. Соискатель благодарит Тома Кушера (Tom Kucsera), Брента Холбена (Brent Holben) и группу Жене Фельдмана (Gene

Feldman) из НАСА за предоставление спутниковых измерений и расчеты перемещения обратных потоков ВТА (Back Trajectory Analyses), а также обработку полученных на севастопольской станции AERONET данных.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 3-х глав, заключения, списка сокращений и обозначений, списка использованных источников. Объем работы составляет 140 страницы, содержит 40 рисунков и 8 таблиц. Библиографический список включает в себя 185 наименований, в том числе 80 на английском языке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации и рассмотрена степень ее разработанности, сформулированы цели и задачи работы, методы исследования, научная новизна, основные положения, выносимые на защиту. Приводится информация о теоретической и практической значимости работы, связь с научными программами, сведения о степени достоверности и апробации результатов исследования, личный вклад автора и список публикаций по теме диссертации.

В **Главе 1** рассматриваются методы и инструменты исследования, дается описание основных оптических характеристик атмосферного аэрозоля.

В *параграфе 1.1* дается информация об основных физических величинах и оптических характеристиках атмосферного аэрозоля. В данной работе характеристики аэрозоля определяются по изменчивости спектральной аэрозольной оптической толщины (АОТ) (*пункт 1.1.1*), параметра Ангстрема (α) (*пункт 1.1.2*), а также распределения аэрозольных частиц по размерам (вклад в общее распределение грубодисперсных и мелкодисперсных частиц) (*пункт 1.1.3*).

В *параграфе 1.2* представлены характерные типы атмосферного аэрозоля над Черным морем и методы их идентификации. В *пункте 1.2.1* дано описание фоновое аэрозоля и его оптических характеристик для различных регионов. В *пункте 1.2.2* представлены оптические характеристики пылевого (почвенного) аэрозоля. По ряду признаков выделяются основные источники поступления минеральной пыли – это зоны аридной седиментации, обусловленные климатом (недостатком воды). Над такими участками суши образуется аэрозоль, который транспортируется воздушными потоками на разных высотных уровнях и выпадает на подстилающую поверхность, в том числе поверхность океана (Avila, Reñuelas, 1999; Лисицын, 2011). Пылевой перенос способствует поступлению в верхний слой водоемов макроэлементов, таких как фосфор (Ridame, Guieu, 2002; Markaki, et al., 2003; Guieu, et al., 2010), азот (Herut, et al., 1999; Sandroni, et al., 2007; Markaki, et al., 2010), железо (Guieu, et al., 2005; Theodosi, et al., 2010) и кремний (Moreno, et al., 2005). Дополнительный источник неорганического фосфора может достигать 15% от объема «новой продукции» и 14% от объема общей первичной продукции в верхнем перемешанном слое (Ridame, Guieu, 2002). Авторы (Guo, et al., 2016; Varenik, Kalinskaya, 2021) отмечают, что поступление газов и взвешенных веществ из воздушных масс, принесенных из

Сахары, является важным источником биогенных веществ для Средиземного моря. В работе (Лифанчук, 2017) рассмотрены характеристики доминирующих видов фитопланктона северо-восточной части Черного моря. Так было определено, что при добавлении только фосфора или одновременно азота и фосфора интенсифицируется рост кокколитофорид, при этом вклад фосфора в стимулирование их роста значительно превышает вклад азота. В последнее время в Черном море отмечается тенденция усиления роли этого вида водорослей в формировании биомассы (Паутова, и др., 2007). Поскольку, по некоторым оценкам (Milliman, 1993), кокколитофорида производят до половины морского карбоната кальция, поступление фосфатов с пылевым аэрозолем может быть важным фактором, влияющим на биологические характеристики поверхностного слоя Черного моря. Также в *пункте 1.2.2* представлен анализ воздействия переноса пылевого аэрозоля на изменчивость концентрации хлорофилла-а в верхнем слое различных водоемов. В *пункте 1.2.3* представлена информация об аэрозоле дыма, который включает в себя промышленный и антропогенный аэрозоль, а также органический аэрозоль (сажу).

В *параграфе 1.3* приводится описание инструментов и типов натурных, спутниковых и модельных данных. В *пункте 1.3.1* представлена информация о данных сети AERONET (Aerosol ROboties NETwork). Представлены методы и аппаратура натурных исследований аэрозолей, а именно: принцип работы международной сети, все измерительные станции которой оснащены солнечными фотометрами Cimel-318. Также в данном параграфе приведена информация об отечественном аналоге приборов сети AERONET – спектральном портативном фотометре SPM (Sun Photometer Mobile) и особенностях его использования (*пункт 1.3.2*).

Параграф 1.4 посвящен дополнительным источникам данных для определения оптических характеристик аэрозоля. В *пункте 1.4.1* представлены методы, аппаратура и алгоритм определения типов атмосферного аэрозоля по спутниковым данным CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation). Особенностью спутниковой информации является обработка измерений по алгоритму, основанному на оценке коэффициента деполяризации (δv). В соответствии с его значениями проводится классификация аэрозолей по типам: $\delta v \in (0,025-0,05)$ – чистый морской аэрозоль, $\delta v \in (0,05-0,15)$ – частицы загрязненной пыли или смога, $\delta v \in (0,15-0,5)$ – с высокой вероятностью пылевой аэрозоль (Vaughan, et al., 2009; Omar, et al., 2005; Omar, et al., 2007; Omar, et al., 2009; Калинская, Папкина, 2017). В *пункте 1.4.2* представлено описание измерений аэрозолей сканерами цвета. Спутниковые сканеры цвета MODIS/Aqua, VIIRS, Sentinel/OLCI являются измерителями спектральной величины яркости восходящего излучения на верхней границе атмосферы (L_t). Измеряемый сигнал дополнительно включает рассеянное аэрозольными частицами и молекулами воздуха излучение, френелевское отражение от границы вода – воздух, а также излучение верхнего слоя моря. В *пункте 1.4.3* описаны особенности работы с данными в системе EOSDIS (Earth Observing System (EOS) Data and Information System). Данные на этой платформе организованы в виде тематических слоев. В частности, слой спутникового

изображения, созданный с учетом параметра ADS (AIRS Dust Score), позволяет эффективно детектировать атмосферные аэрозоли над акваториями океанов. Алгоритм его построения основан на сравнении спектральной яркости в каналах, чувствительных к пыли, с яркостью в каналах, нечувствительных к ней. Если ADS выше $380 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм}$, то вероятность наличия в атмосфере пылевого аэрозоля близка к 100%. *Пункт 1.4.4* содержит описание программного комплекса модели SILAM (System for Integrated modeling of Atmospheric composition), которая широко используется для изучения воздействия лесных пожаров, извержений вулканов, переноса пыли, а также других природных и техногенных катастроф на загрязнение атмосферы в целом. В *пункте 1.4.5* приведено описание системы FIRMS (Fire Information for Resource Management System). Эта система предоставляет данные об активных пожарах в режиме, близком к реальному времени: информация обновляется в течение трех часов после пролета спутников. Для детектирования очагов используются данные как спектрорадиометра MODIS, так и спутникового зонда высокого пространственного разрешения VIIRS. Ключевой характеристикой системы FIRMS для определения интенсивности температурной аномалии (пожара) является измеренная мощность излучения – параметр Fire Radiative Power (FRP) в МВт. FRP определяет количество тепловой энергии, выделяемой за единицу времени при горении растительного покрова. Существует несколько программных комплексов для расчета обратных траекторий, получивших широкое распространение благодаря своей доступности и гибкости. В *пункте 1.4.6* описан программный комплекс модели HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model). Эта модель служит для расчета траекторий воздушного потока, а также комплексного переноса, химического преобразования и осадков. В *пункте 1.4.7* дана информация о программном комплексе модели AERONET. Проанализированы семидневные обратные траектории ВТА (Back Trajectory Analyzes), которые предоставляются в открытом доступе для всех станций сети AERONET ежедневно с начала эксплуатации соответствующей станции. Траектория движения воздушного потока представляет собой набор точек в пространстве, каждая из которых определяется координатами положения лагранжевой частицы в определенный момент времени.

Отмечено, что оптические характеристики атмосферного аэрозоля, полученные отдельно по натурным, модельным, или спутниковым данным не дают объективной оценки. Только комплексное исследование трех типов данных позволяет получить наиболее полную информацию об атмосферном аэрозоле, источниках аэрозольной активности, направлении перемещения воздушных потоков на разных высотах, а также области осаждения и воздействия аэрозоля на подстилающую поверхность.

В **Главе 2** приведен анализ основных оптических характеристик трех типов аэрозолей над Черным морем. Для количественной оценки оптических характеристик фоновое, пылевое и дымовое аэрозоля над акваторией Черного моря необходимо определить инструмент, позволяющий регистрировать каждый из этих аэрозолей по отдельности. В качестве такого инструмента в данной главе

предложен и описан (*параграф 2.1*) алгоритм определения источников приземного аэрозоля. Он основан на анализе обратных траекторий воздушных масс (Back Trajectory Analysis, ВТА), что позволяет выполнить пространственно-временную локализацию источников приземного аэрозоля. Ключевым параметром метода является производная давления по времени (P'_t), положительная величина которой соответствует восходящим воздушным потокам, отрицательная – нисходящим. Идентификация местоположения источника аэрозоля, образовавшегося у поверхности Земли, осуществляется при одновременном выполнении двух условий: 1) воздушная масса находится в приземном слое ($P > 700$ мбар); 2) существует восходящий поток со скоростью несколько см/с и более ($P'_t > 20$ мбар/час), что соответствует мезомасштабным вертикальным восходящим потокам с высотами порядка 10–100 км. Значение 20 мбар/ч определено исходя из результатов анализа обратных траекторий многолетнего массива (2007–2012 гг.) для севастопольской станции AERONET. В алгоритме также учтена возможность смены доминирующего типа аэрозоля в исследуемом атмосферном слое. Критерием такого процесса является регистрация в приземном слое ($P > 700$ мбар) нисходящего воздушного потока ($P'_t < 20$ мбар/ч). При выполнении такого условия считалось, что атмосферный слой уже не содержит аэрозоль, захваченный ранее восходящими потоками с поверхности Земли. Валидация метода проведена по данным севастопольской станции сети AERONET и спутникового оптического сканера MODIS. На примере пылевого аэрозоля из двух аридных районов (Сахары и Сирии) было показано наличие связи между районом зарождения аэрозоля и специфическими оптическими характеристиками аэрозоля, наблюдаемыми на севастопольской станции по данным AERONET. Результаты исследований источников генерации аэрозоля представляют интерес для специалистов, решающих задачи атмосферной коррекции измерений восходящей яркости на верхней границе атмосферы в видимом диапазоне спектра над водной поверхностью (Калинская, Суслин, 2015).

В *параграфе 2.2* представлена статистика источников генерации аэрозоля над Черным морем по сезонам и географическому положению. По алгоритму, описанному в *параграфе 2.1*, было проведено сопоставление результатов, полученных в 2016 г., с многолетним массивом данных ВТА, полученных с помощью сети AERONET. Для периода с 2007 по 2016 гг. показано, что при регистрации события выноса пылевого аэрозоля основное влияние на оптические характеристики атмосферы над исследуемым регионом оказывает перенос аридного аэрозоля в приземном слое (высоты ВТА AERONET 950 гПа, 850 гПа и 700 гПа или 500 м, 1500 м и 3000 м соответственно) (Калинская, Суслин, 2015). Приведены результаты статистического анализа источников приземного аэрозоля на основе результатов данных обратных траекторий моделей AERONET и HYSPLIT. Обе модели предоставляют результаты перемещения атмосферных воздушных потоков на одинаковых высотах. Важным результатом совместной обработки данных моделирования AERONET и HYSPLIT стало выявление случаев их расхождения. Анализ массива обратных

траекторий за 2014–2016 гг. показал, что существуют дни, для которых одна модель указывает на перенос аридного аэрозоля, а другая этого не подтверждает. В весенний период 2016 г. к таким дням относятся 12 и 20 апреля (Рисунок 1).

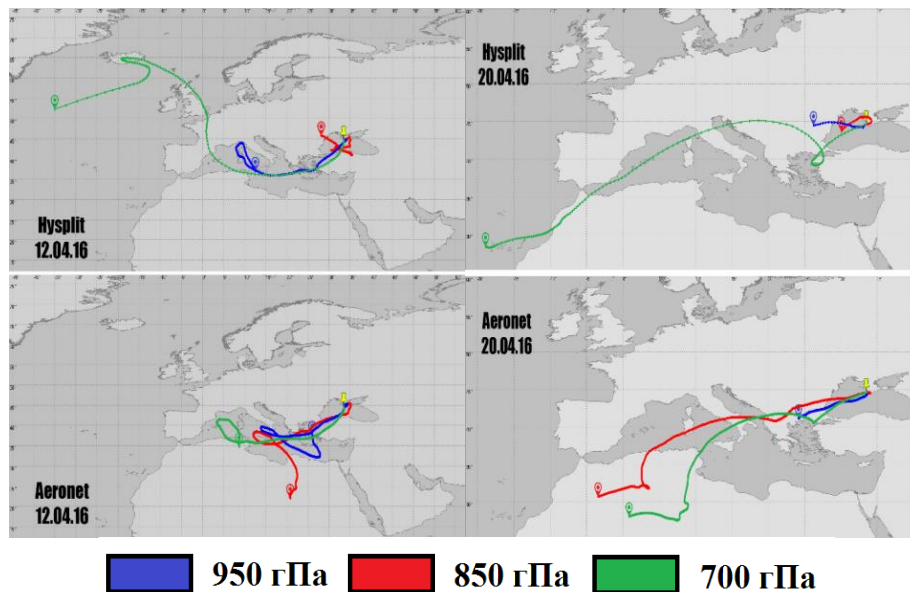


Рисунок 1 – Обратные траектории, полученные в результате моделирования AERONET и HYSPLIT (Калинская, Кудинов, 2017)

Для указанных дат анализ основных оптических характеристик аэрозоля выявил значительное увеличение аэрозольной оптической толщины (АОТ(500) до 0,29 (12 апреля) и 0,39 (20 апреля) при среднегодовом значении 0,17 и низкий параметр Ангстрема ($\alpha < 0,6$ при среднегодовом 1,22), а также преобладание крупных частиц аэрозоля в атмосфере над черноморским регионом. Комплексный анализ оптических характеристик аэрозоля и результатов обратных траекторий двух моделей показал, что результаты моделирования HYSPLIT менее достоверны для анализа переносов воздушных масс пылевого аэрозоля над черноморским регионом, чем результаты AERONET.

В *параграфе 2.3* рассматриваются оптические характеристики трех типов аэрозоля над акваторией Черного моря. Вследствие географического положения свойства черноморского аэрозоля могут существенно отличаться от океанического (Suslin et al., 2007). В связи с этим одной из задач исследования являлось использование прямых измерений сети AERONET для определения места черноморского аэрозоля в системе основных типов, характерных для земной атмосферы.

В *пункте 2.3.1* приводится анализ оптических характеристик фонового аэрозоля. Так, для региона Черного моря фоновыми являются следующие оптические величины: аэрозольная оптическая толщина на длине волны 500 нм $АОТ(500) = 0,22 \pm 0,05$; параметр Ангстрема $\alpha = 1,3 \pm 0,3$. Имеет место бимодальное распределение частиц по размерам, причем вклад мелкодисперсных и крупнодисперсных частиц в общее распределение АОТ практически одинаков. Показано, что по основным оптическим характеристикам АОТ(870) и α черноморский аэрозоль близок к континентальному. *Пункт 2.3.2*

содержит информацию о качественном и количественном составе биогенных элементов в пылевом аэрозоле над Черным морем. Среднегодовое за 2010–2015 гг. значение концентрации составило $1,22 \mu\text{M}$ для фосфатов и $2,25 \mu\text{M}$ для кремния. При расчете этих величин были исключены данные по концентрации SiO_3^{2-} за 2010 г. и PO_4^{3-} за 2015 г. Это связано с тем, что в эти годы были определены даты, когда значения концентраций были экстремально высокими: 05.06.2015 г. концентрация PO_4^{3-} составила $408,51 \mu\text{M}$; 14.09.2010 г. концентрация SiO_3^{2-} составила $284,51 \mu\text{M}$, превышая среднегодовые значения более, чем в 100 раз. Коэффициенты корреляции высоких значений АОТ и концентраций микроэлементов (PO_4^{3-} и SiO_3^{2-}) в осадках составили $R = 0,79$ и $R = 0,73$ соответственно. Данные обратных траекторий по моделям AERONET и HYSPLIT показали наличие переноса со стороны Сирийской пустыни 05.06.2015 г., со стороны пустыни Сахара – 14.09.2010 г. Значение $\text{AOT}(500) = 0,52$, полученное как среднее значение для дней с аномально высокими значениями концентраций PO_4^{3-} и SiO_3^{2-} , более чем в 2 раза превышает фоновое значение $\text{AOT}(500) = 0,22$ за весь исследуемый период (Калинская, и др., 2018). Комплексный анализ АОТ и данных обратных траекторий по результатам моделей AERONET и HYSPLIT подтвердил, что наблюдавшиеся в атмосферных осадках повышенные концентрации PO_4^{3-} и SiO_3^{2-} , превышающие среднегодовое значение более чем в 10 раз, во всех случаях определялись переносом пылевого аэрозоля со стороны пустыни Сахара и Ближнего Востока (Калинская, и др., 2018). Так для региона Черного моря для пылевого аэрозоля получаем следующий набор оптических характеристик: $\text{AOT} > 0,3$, $\alpha < 0,8$; в распределении частиц по размерам выявлено доминирование крупных частиц ($dV(r)/d\ln(r) > 1$).

В пункте 2.3.3 дано описание оптических характеристик и состав микроэлементов дымового аэрозоля (сажа). Представлена информация о качественном и количественном составе биогенных элементов в дымовом аэрозоле над акваторией Черного моря. Исследование за 2007–2019 гг. позволило определить период (август 2017 года), характеризующийся особой активностью пожаров по мощности излучения и по количеству возгораний. Проанализированы основные оптические и микрофизические характеристики атмосферного аэрозоля для периодов с наибольшим для черноморского региона количеством пожаров. В результате процессов горения в воздух поступают оксиды азота. С целью выявления возможной корреляции проведен анализ проб атмосферных осадков на содержание в них нитратного азота для дней с максимальным количеством термоактивных точек, выявленных по спутниковым данным. В период 2007–2019 гг. комплексный анализ изменчивости основных оптических характеристик, спутниковых изображений и проб атмосферных осадков на содержание в них неорганического азота позволил выявить период и даты максимального воздействия на атмосферу аэрозоля горящей биомассы, возникшего вследствие пожаров на побережье и прилегающих к черноморскому региону территориях. Измеренная средневзвешенная величина концентрации азота за 2017 г. в пробах из закрытого осадкосборника составила $78,55 \text{ мкмоль/л}$, из открытого – $91,93 \text{ мкмоль/л}$. Анализ изменчивости основных оптических

характеристик атмосферного аэрозоля и величин концентрации азота в пробах атмосферных осадков показал, что после регистрации интенсивного пожара оба параметра превышают свои среднемесячные и среднегодовые значения более, чем в 1,5–2 раза (Kalinskaya et al., 2020). В результате для дымового аэрозоля и сажи были получены следующие оптические характеристики: $AOT = 0,27 \pm 0,03$, $\alpha = 1,3 \pm 0,2$.

Глава 3 посвящена оценке влияния пылевого аэрозоля на изменчивость биооптических характеристик верхнего слоя Черного моря. Некоторые исследователи (Koren, et al., 2006; Kubilay, 2003) считают, что пыль может быть важным климатообразующим компонентом, особенно над отдельными районами океанов и в регионах с ее высокой концентрацией. Рассматриваются случаи присутствия в атмосфере значительного количества переносимой из пустынь пыли над черноморским регионом.

В *параграфе 3.1* показано влияние пылевого аэрозоля на биооптические характеристики верхнего слоя Черного моря с использованием только спутниковых данных. *Пункт 3.1.1* содержит оценку влияния пылевого аэрозоля на биооптические характеристики верхнего слоя Черного моря за 2010 год. Согласно результатам *пункта 2.3.2* выделение пылевого аэрозоля производилось по превышению в несколько раз средневзвешенной величины концентрации фосфатов и силикатов в атмосферных осадках. Максимальное значение концентрации кремнекислоты наблюдалось 14.09.2010 г. в пробе, отобранной в пгт Кацивели. Для оценки влияния осаждения взвешенных аэрозольных частиц пыли на биооптические характеристики верхнего слоя был проведен анализ (стандартный алгоритм NASA) распределения концентрации хлорофилла-а в поверхностном слое Черного моря до и после прохождения пылевого переноса (Рисунок 2).

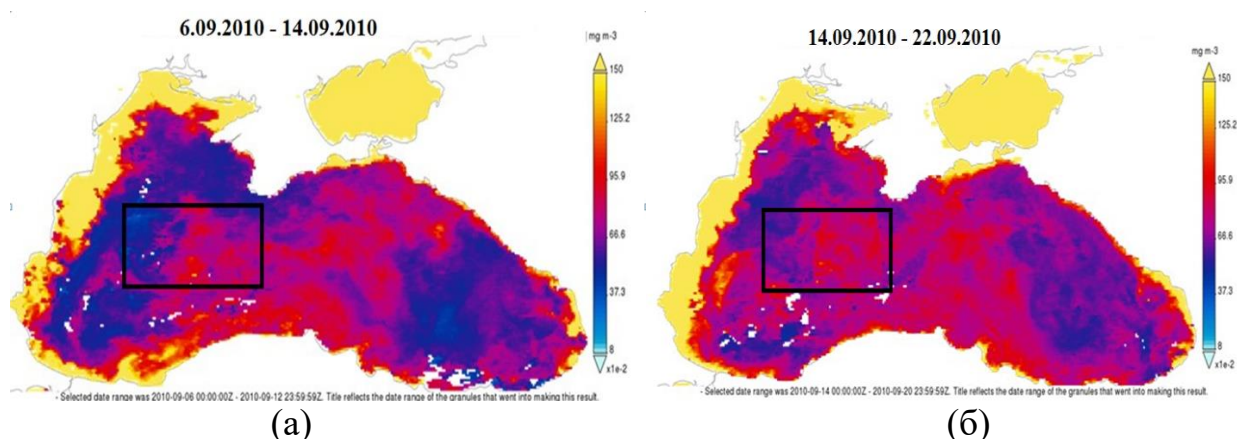


Рисунок 2 – Концентрации хлорофилла-а в поверхностном слое вод Черного моря (Архив GIOVANNI) до выпадения атмосферных осадков (а) и после (б) (Varenik, Kalinskaya, 2021)

Для исключения влияния апвеллинга на изменение концентрации хлорофилла-а в верхнем слое моря был проведен анализ температуры поверхности моря. Исследование данных об изменчивости концентрации хлорофилла-а в период с 29 августа по 8 октября 2010 г. позволило выявить

максимум значений 16.09.2010 г., наблюдаемый через 2 дня после выпадения аномального значения кремнекислоты в осадках.

В пункте 3.1.2 представлена оценка влияния пылевого аэрозоля на биооптические характеристики верхнего слоя Черного моря за 2016 год. Концентрация фосфатов в атмосферных осадках, отобранных 13.05.2016 г., превышала среднегодовое значение более чем в 20 раз. По спутниковому изображению в этот период был виден перенос воздушной массы, содержащей значительное количество пылевого аэрозоля. Анализ карт распределения хлорофилла-а в поверхностном слое вод Черного моря с 8 по 24 мая 2016 года, аналогично предыдущему случаю, выявил область повышенной концентрации (Рисунок 3). Понижения температуры воды не наблюдалось, следовательно явление не обусловлено апвеллингом. Таким образом, отклик экосистемы моря был зарегистрирован через 3 дня после пылевого переноса. Полученные результаты демонстрируют, что выпадение фосфора и кремния с атмосферными осадками имеет большое значение для оценки биооптических характеристик Черного моря.

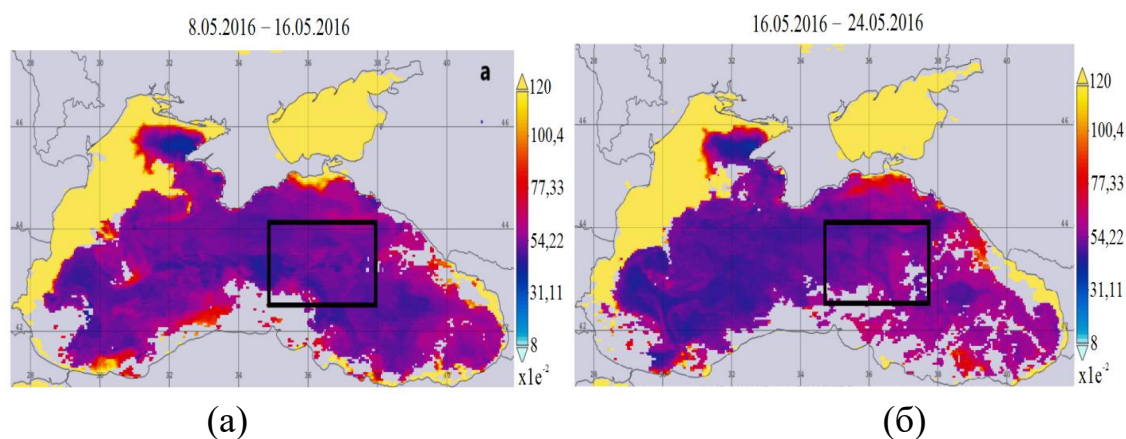


Рисунок 3 – Изменчивость концентрации хлорофилла-а в поверхностном слое вод Черного моря (Архив GIOVANNI) до выпадения атмосферных осадков (а) и после (б) (Varenik, Kalinskaya, 2021)

В пункте 3.1.3 дана оценка влияния пылевого аэрозоля на биооптические характеристики верхнего слоя Черного моря в 2018 году. По спутниковым данным весной было зафиксировано 2 переноса пылевого аэрозоля со стороны Сахары в регион Черного моря: в период с 19 по 29 марта 2018 г. – интенсивный и длительный перенос, 2 апреля 2018 г. – однодневный. Анализ проб осадков показал, что 22.03.2018 г. в атмосферных осадках концентрация фосфатов составила 4,73 мкмоль/л, силикатов – 14,69 мкмоль/л; 02.04.2018 г. – 2,28 мкмоль/л и 8,22 мкмоль/л соответственно. Полученные показатели превышают среднюю за год концентрацию исследуемых биогенных элементов в 5 и 7 раз для фосфатов и в 2,5 и 4 раза для силикатов соответственно.

Для оценки воздействия дополнительного поступления минеральных веществ вследствие пылевого переноса были изучены карты распределения концентрации хлорофилла-а (стандартный алгоритм NASA) в верхнем слое Черного моря до и после выпадения осадков в районе прохождения пылевых

воздушных масс. Область повышенной концентрации хлорофилла-а начала формироваться спустя два дня после окончания эпизода пылевого переноса 04.04.2018 г. К 7 апреля она достигла максимума, образовав зону цветения в центрально-южной части Черного моря, после чего концентрация начала снижаться. Хотя такое увеличение теоретически могло быть связано с апвеллингом, анализ аномалий температуры поверхности моря для соответствующих районов моря не выявил отрицательных температурных отклонений за этот период (Рисунок 4), что исключает данный механизм. В районе пика хлорофилла-а 7 апреля 2018 г. его концентрация более чем в 10 раз превысила как среднемноголетний апрельский уровень 2013–2018 гг. ($0,92 \text{ мг/м}^3$), так и среднемесячный фон апреля 2018 года (Рисунок 3).

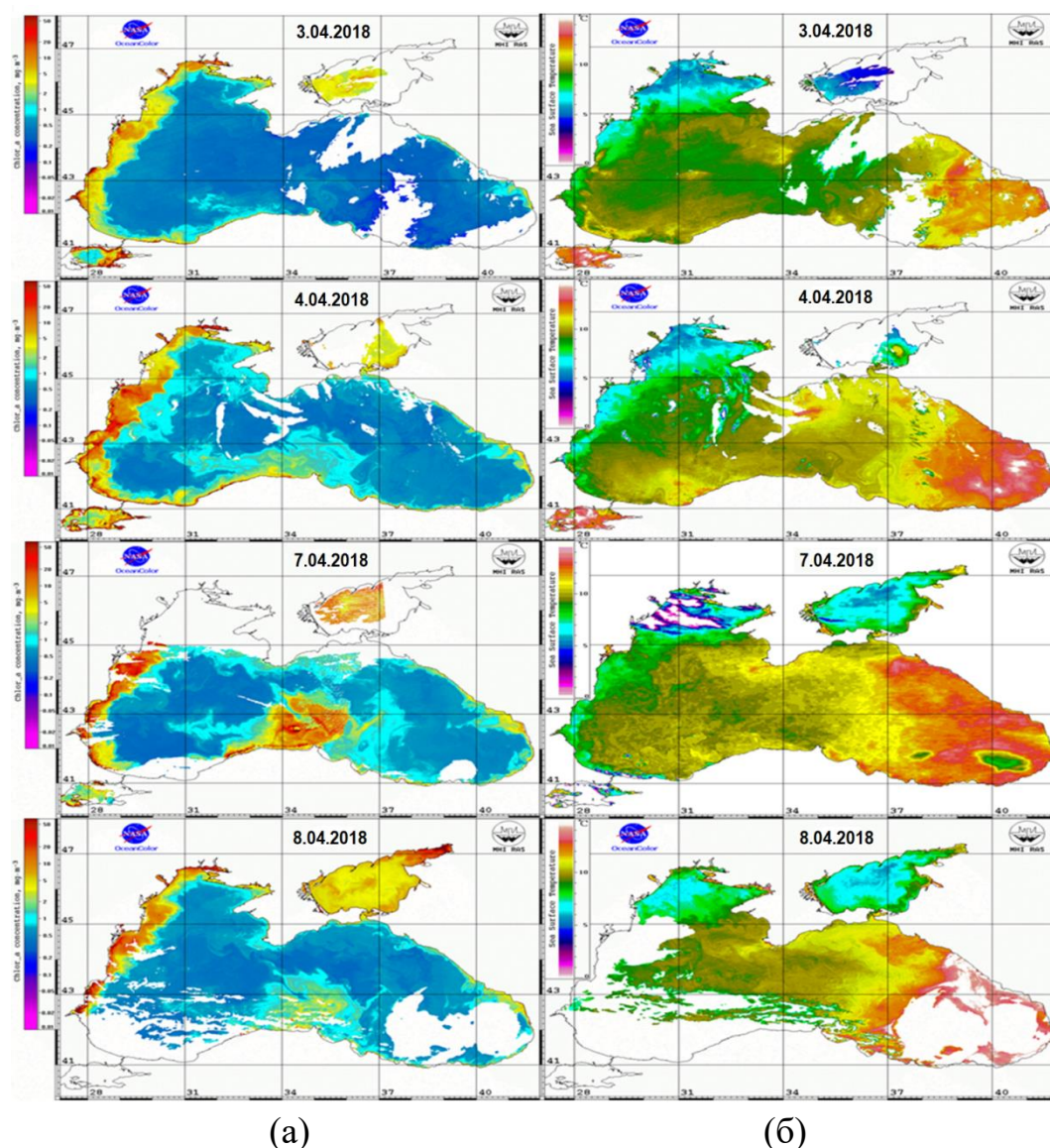


Рисунок 4 – Изменчивость концентрации хлорофилла-а (а) и температуры (б) с 3 по 8 апреля 2018 г. (Kalinskaya, Varenik, 2019)

Некорректные оценки концентрации хлорофилла-а по спутниковым данным могли быть получены из-за аэрозоля, который длительное время после прохождения пылевого переноса может оставаться в определенных слоях

атмосферы и не оседать. Для исключения данного фактора был проведен анализ АОТ над областью повышенной концентрации хлорофилла-а по спутниковым данным. Повышенные значения АОТ были зафиксированы 02.04.2018 г. В период с 3 по 8 апреля 2018 г. величины АОТ не превышали фоновых значений, что подтверждает рост значений концентрации хлорофилла-а за счет дополнительного поступления микроэлементов, являющихся источником питания фитопланктона, из атмосферы в верхний слой моря.

По результатам исследования эпизодов поступления пылевого аэрозоля, обогащенного биогенными микроэлементами, был сделан вывод об отсроченном характере его влияния на биооптические характеристики морской среды. Это влияние, опосредованное стимуляцией развития фитопланктона, проявляется не сразу, так как процессу роста биопродуктивности предшествует несколько условий: 1) микроэлементы, которые могут являться источником дополнительного питания для фитопланктона, должны попасть в водоем в большом количестве, а значит пылевой перенос должен быть интенсивным и длительным по времени; 2) фитопланктон должен находиться на глубине, позволяющей усвоить микроэлементы, попавшие в воду с сухими или мокрыми осадками в результате пылевой бури; 3) осаждение микроэлементов в результате пылевого переноса происходит не в период интенсивного цветения кокколитофорид в Черном море, иначе будет наблюдаться резкое увеличение коэффициента яркости моря, а значит увеличение биопродуктивности из-за усвоения фитопланктоном микроэлементов будет маловероятно. Нарушение или отсутствие одного из условий не приводит к увеличению концентрации фитопланктона.

Параграф 3.2 посвящен влиянию пылевого аэрозоля на биооптические характеристики верхнего слоя Черного моря с использованием спутниковых данных и измерений *in situ*. Представлен анализ события осеннего переноса взвешенных частиц PM_{10} с востока в акваторию и прибрежные районы Черного моря, а также значений оптических характеристик взвешенных частиц по натурным и спутниковым данным. Взвешенные частицы (PM – Particulate Matter) относятся к загрязнителям атмосферы, которые чаще всего анализируют по массовым концентрациям частиц. Особое внимание необходимо уделять концентрации переносимых в воздухе веществ с размерами частиц меньше $2,5$ ($PM_{2,5}$) и 10 мкм (PM_{10}) (Ревич, 2018; Кузнецова, и др., 2014). Показана взаимосвязь между изменчивостью оптических характеристик частиц PM_{10} и увеличением значений интенсивности флюоресценции растворенного органического вещества в поверхностном слое моря, которые были получены в экспедиции у северо-восточного побережья Черного моря с борта НИС «Профессор Водяницкий». По данным измерений фотометром SPM в период экспедиции среднедневное значение аэрозольной оптической толщины за 29.09.2020 г. $AOT(500) = 0,27$, за 30.09.2020 г. $AOT(500) = 0,26$, что более чем в 1,5 раза превышает среднемесячное значение $AOT(500) = 0,156$. Анализ вклада мелко и грубодисперсной фракции в общую величину АОТ за исследуемые дни показал, что атмосферный аэрозоль более чем на 70% состоял из частиц мелкодисперсной фракции. Среднедневные значения влагосодержания 29–

30 сентября 2020 г. превышали среднемесячные более чем в полтора раза, следовательно, указанные частицы конденсировали влагу. По мере развития и движения облака они выпали с осадками на подстилающую поверхность региона исследования.

На Рисунке 5 показан средний профиль интенсивности флюоресценции растворенного органического вещества (ИФ РОВ) за 2 недели до выпадения осадков, содержащих взвешенные частицы PM_{10} (синяя кривая); средний профиль ИФ РОВ за 2 дня до 30 сентября 2020 г., в течение которых частицы PM_{10} предположительно уже могли осаждаться на поверхностный слой вод северо-западного шельфа, так как уже наблюдался интенсивный перенос частиц в этом направлении (зеленая кривая); средний профиль ИФ РОВ через 2 дня после 30 сентября, т.е. во время осаждения и заглубления осажденных взвешенных частиц в исследуемом регионе (красная кривая). Полученные данные были осреднены за двухнедельный период по одним и тем же точкам проведения рейсовых измерений в квадрате с координатами 44,07728°N, 36,98396°E; 44,07728°N, 36,44407°E; 43,78721°N, 36,44407°E; 43,78721°N, 36,98396°E.

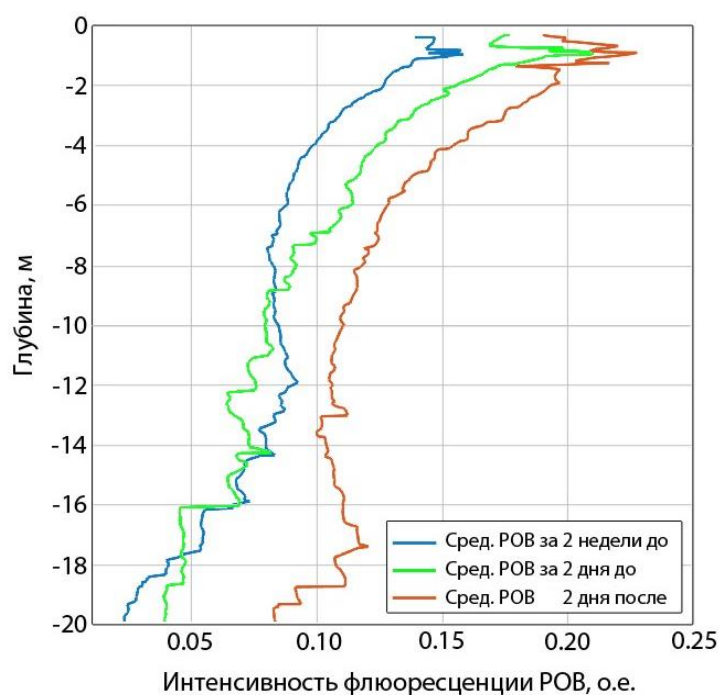


Рисунок 5 – Изменчивость вертикального профиля интенсивности флюоресценции (ИФ) растворенного органического вещества (РОВ) (Калинская, Кудинов, 2021)

Как видно из Рисунка 5, профили ИФ РОВ в поверхностном 5-ти метровом слое за две недели до переноса аэрозоля отличаются от профилей, измеренных 2 октября, в 1,5 раза. Наиболее существенные различия наблюдаются в верхнем 2-х метровом слое при сравнении данных за два дня до и два дня после выпадения осадков. Это свидетельствует о том, что осаждение взвешенных частиц (PM_{10}) не сводится исключительно к их поступлению с дождём («влажное

осаждение»), но также происходит непрерывно в ходе переноса за счёт процессов сухого осаждения.

В **Заключении** приводятся основные результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Диссертационная работа посвящена определению влияния трех типов аэрозоля и пространственно-временного положения их источников на биооптические характеристики верхнего слоя Черного моря. Комплексный анализ полученных результатов выполнен на основе использования натурных измерений фотометрами CIMEL-318 и SPM, спутниковых измерений приборами MODIS, VIIRS, OLCI, CALIPSO и результатов расчета обратных траекторий переноса воздушных потоков по данным моделирования AERONET и HYSPLIT.

Основные научные результаты исследования могут быть сформулированы следующим образом.

1) Предложен алгоритм определения пространственно-временного положения источников приземного аэрозоля, основанный на результатах анализа обратных траекторий ВТА. Показано наличие связи между районом зарождения аэрозоля и специфическими оптическими характеристиками аэрозоля над черноморским регионом; получены карты плотности положения источников аэрозоля и их сезонная и межгодовая изменчивость за период 2007–2017. Предложенный алгоритм был использован для подтверждения (совместно с другими критериями) нахождения пылевого и дымового аэрозоля над акваторией Черного моря.

2) Для трех основных типов черноморского аэрозоля: фонового, пылевого и дымового получены количественные оценки аэрозольной оптической толщины, параметра Ангстрема и функции распределения частиц по размерам на основе прямых измерений над Черным морем фотометрами SPM и Cimel-318. Фоновому аэрозолю соответствуют значения $AOT = 0,22 \pm 0,05$, $\alpha = 1,3 \pm 0,3$; для пылевого аэрозоля $AOT > 0,3$, $\alpha < 0,8$; а для аэрозоля дыма $AOT = 0,27 \pm 0,03$, $\alpha = 1,3 \pm 0,2$. Для распределения частиц по размерам в случае наличия в атмосфере фонового и дымового аэрозоля характерно преимущество мелкодисперсных частиц ($dV(r)/d\ln(r) < 1$), а для пылевого аэрозоля – доминирование крупных частиц ($dV(r)/d\ln(r) > 1$).

3) Выявлена сезонная изменчивость выносов аридного аэрозоля для региона Черного моря на примере пылевого аэрозоля из двух аридных районов (Сахара и Сирия) по данным обратных траекторий двух моделей ВТА (Back Trajectory Analysis) AERONET (Aerosol Robotic Network) и HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model). Статистическая обработка данных двух моделей ВТА дала совпадение по двум аспектам: 1) наибольшее количество переносов со стороны пустыни Сахара над Черноморским регионом на трех исследуемых высотах происходит весной; 2) в атмосферном столбе 500 – 3000 м наиболее часто перенос был зарегистрирован на высоте 3 км (слой 700 гПа).

4) Полученные в результате анализа трех типов атмосферного аэрозоля данные позволили получить оценки комплексного влияния на биооптические характеристики поверхностного слоя вод акватории Черного моря как природно-климатических, так и антропогенных факторов.

5) Показано, что все рассмотренные случаи переноса пылевого аэрозоля над акваторией Черного моря вызывают кратковременное изменение оптических свойств верхнего слоя воды, которое проявляется в увеличении суммарного показателя поглощения света с небольшой задержкой по времени после данного события. Установлены и доказаны причины роста суммарного поглощения света вследствие высоких концентраций биогенных веществ PO_4^{3-} и SiO_3^{2-} в пылевом аэрозоле.

6) Получена оценка отклика экосистемы открытой части Черного моря на осаждение на поверхность вод биогенных веществ (PO_4^{3-} , SiO_3^{2-} , NO_2 , NO_3 , NH_4), содержащихся в пылевом аэрозоле, которая проявилась во временном росте концентрации фитопланктона.

7) При использовании спутниковых данных MODIS и CALIPSO получены оценки влияния прохождения пылевого аэрозоля на содержание в атмосферных выпадениях взвешенных частиц (PM), флюоресценции (ИФ) растворенного органического вещества (POB).

ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ РАБОТЫ

1. **Калинская Д.В.** Исследование особенностей оптических характеристик пылевого аэрозоля над Черным морем / **Д.В. Калинская** // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2012. – №. 26 (2). – С. 151-162.

2. Толкаченко Г.А. Оценка пространственных масштабов аэрозольной атмосферы над акваторией Черного моря / Г.А. Толкаченко, **Д.В. Калинская**, А.В. Смирнов, Ю.А. Прохоренко // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2012. – Т. 5. – №. 4. – С. 69-79.

3. **Калинская Д.В.** Простой метод определения источников приземного аэрозоля на основе результатов анализа обратных траекторий / **Д.В. Калинская**, В.В. Суслин // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2015. – Т. 8, №. 1. – С. 59-67.

4. Суслин В.В. Оптические свойства черноморского аэрозоля и верхнего слоя морской воды по данным прямых и спутниковых измерений / В.В. Суслин, В.Х. Слабакова, **Д.В. Калинская**, С.Ф. Пряхина, Н.И. Головкин // Морской гидрофизический журнал. – 2016. – №. 1 (187). – С. 20-32.

5. **Калинская Д.В.** Результаты измерений аэрозольной оптической толщи атмосферы в черноморском регионе (2015–2016) / **Д.В. Калинская**, Д.М. Кабанов, А.А. Латушкин, С.М. Сакерин // Оптика атмосферы и океана. – 2017. – Т. 30, №. 6. – С. 489-496. DOI: 10.15372/AOO20170607.

6. **Калинская Д.В.** Фосфор и кремний как маркеры переноса пылевого аэрозоля над черноморским регионом / **Д.В. Калинская**, А.В. Вареник, А.С. Папкина // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из

космоса. – 2018. – Т. 15, №. 3. – С. 217-225. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-217-225. (**Kalinskaya D.V.** Phosphorus and Silicon as Markers of Dust Aerosol Transfer over the Black Sea Region / **D.V. Kalinskaya**, A.V. Varenik, A.S. Papkova // *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. – 2018. – 15(3). – P. 217–225).

7. **Калинская Д.В.** Исследование характеристик аэрозолей над Черным морем посредством системы FIRMS во время пожаров за период 2007–2018 гг. / **Д.В. Калинская**, Д.А. Рябоконт // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2019. – Т. 16, №. 4. – С. 247-255. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-247-255. (**Kalinskaya D.V.** A Study of Aerosol Characteristics over the Black Sea by the FIRMS System during Forest Fires in 2007–2018 / **D.V. Kalinskaya**, D.A. Ryabokon // *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. – 2019. – 16(4). – P. 247–255).

8. **Калинская Д.В.** Исследование изменчивости оптических и микрофизических характеристик аэрозолей над Черным морем под воздействием пожаров Причерноморья за 2018–2019 годы / **Д.В. Калинская**, А.С. Папкина, Д.М. Кабанов // *Морской гидрофизический журнал*. – 2020. – Т. 36, №. 5 (215). – С. 559-570. DOI: 10.22449/0233-7584-2020-5-559-570. (Перевод: **Kalinskaya D.V.** 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 / **D.V. Kalinskaya**, A.S. Papkova, D.M. Kabanov // *Physical Oceanography*. – 2020. – V. 27, № 5. – P. 514-524. DOI: 10.22449/1573-160X-2020-5-514-524).

9. Вареник А.В. Исследование взвешенных микрочастиц в атмосфере береговой зоны Черного моря по натурным и спутниковым данным / А.В. Вареник, **Д.В. Калинская**, М.А. Мыслина // *Морской гидрофизический журнал*. – 2021. – Т. 37, №. 3 (219). – С. 350-361. DOI: 10.22449/0233-7584-2021-3-350-361. (Перевод: Varenik A.V. Investigation of Airborne Particulate Matter in the Atmosphere of the Black Sea Coastal Zone Based on the Measured and Satellite Data / A.V. Varenik, **D.V. Kalinskaya**, M.A. Myslina // *Physical Oceanography*. – 2021. – V. 28, № 3. – P. 326-337. DOI: 10.22449/1573-160X-2021-3-326-337).

10. **Калинская Д.В.** Влияние атмосферного переноса взвешенных частиц PM_{10} на оптические характеристики поверхностного слоя Черного моря / **Д.В. Калинская**, О.Б. Кудинов // *Оптика атмосферы и океана*. – 2021. – Т. 34, № 2(385). – С. 107-111. DOI: 10.15372/AOO20210205. (Перевод: **Kalinskaya D.V.** Influence of Atmospheric Transport of Suspended PM_{10} Particles on the Optical Characteristics of the Surface Layer of the Black Sea / **D.V. Kalinskaya**, O.B. Kudinov // *Atmospheric and Oceanic Optics*. – 2021. – V. 34, № 3 – P. 205-211. DOI: 10.1134/S1024856021030076).

11. Varenik A.V. The Effect of Dust Transport on the Concentration of Chlorophyll-a in the Surface Layer of the Black Sea / A.V. Varenik, **D.V. Kalinskaya** // *Applied Sciences (Switzerland)*. – 2021. – V. 11, № 10. – P. 4692. DOI: 10.3390/app11104692.

12. Korchemkina E.N. Algorithm of Additional Correction of Level 2 Remote Sensing Reflectance Data Using Modelling of the Optical Properties of the Black Sea

Waters / E.N. Korchemkina, **D.V. Kalinskaya** // Remote Sensing. – 2022. – V. 14, № 4. – 831. DOI: 10.3390/rs14040831.

13. **Kalinskaya D.V.** Why Is It Important to Consider Dust Aerosol in the Sevastopol and Black Sea Region during Remote Sensing Tasks? A Case Study / **D.V. Kalinskaya**, A.S. Papkova // Remote Sensing. – 2022. – V. 14, № 8. – 1890. DOI: 10.3390/rs14081890.

14. Калинская Д.В. Влияние циклона на пространственное распределение дымового аэрозоля от пожаров в мае 2021 года / Д.В. Калинская // Морской гидрофизический журнал. – 2022. – Т. 38, № 3 (225). – С. 324-340. DOI: 10.22449/0233-7584-2022-3-324-340. (Перевод: **Kalinskaya D.V.** Impact of the Cyclone on Spatial Distribution of the Smoke Aerosol Resulted from the Fires in May, 2021 / **D.V. Kalinskaya** // Physical Oceanography. – 2022. – V. 29, № 3. – P. 303-319. DOI: 10.22449/1573-160X-2022-3-303-319).

15. **Калинская Д.В.** Изменчивость коэффициента яркости в условиях пылевого переноса по данным спутника Sentinel-3 на примере Черного моря и Севастополя / **Д.В. Калинская**, А.С. Папкова // Морской гидрофизический журнал. – 2023. – Т. 39, № 3(231). – С. 399-415. DOI: 10.29039/0233-7584-2023-3-399-415. (Перевод: **Kalinskaya D.V.** Variability of the Water-Leaving Radiance under Conditions of Dust Transport by the Sentinel-3 Satellite Data on the Example of the Black Sea and Sevastopol / **D.V. Kalinskaya**, A.S. Papkova // Physical Oceanography. – 2023. – V. 30, № 3. – С. 369- 383. DOI: 10.29039/1573-160X-2023-3-369-383).

16. Папкова А.С. Влияние пылевого аэрозоля на спутниковые данные различных сканеров цвета / А.С. Папкова, Е.Б. Шибанов, **Д.В. Калинская** // Морской гидрофизический журнал. – 2024. – Т. 40, № 5(239). – С. 766-781. EDN: WUXIXB. (Перевод: Papkova A.S. The Effect of Dust Aerosol on Satellite Data from Different Color Scanners / A.S. Papkova, E.B. Shybanov, **D.V. Kalinskaya** // Physical Oceanography. – 2024. – V. 31, № 5. – P. 720-735. EDN: AKOILG).

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

17. Кудинов О.Б. Свидетельство Российской Федерации № 2022667490 о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа для реализации методики определения источников приземного аэрозоля на основе результатов данных моделей «AERONET» и «HYSPLIT» / О.Б. Кудинов, **Д.В. Калинская**. Заявитель и правообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН» // Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 21 сентября 2022 г. – EDN RJWRFW.

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук
Калинской Дарьи Владимировны

Подписано к печати 27.11.2025 г.

Объем 0,9 п.л.

Формат бумаги 60×84 1/16

Заказ № 47

Тираж 100 экз.

Напечатано в типографии СРОО «Дом Солнца»
299055, г. Севастополь, ул. Хрусталева, 143
Тел.: +7(8692) 65-60-11
cdpi@rambler.ru